



## Result Page

Notice: This translation is produced by an automated process; it is intended only to make the technical content of the original document sufficiently clear in the target language. This service is not a replacement for professional translation services. The esp@cenet® Terms and Conditions of use are also applicable to the use of the translation tool and the results derived therefrom.

The invention relates to a device and a method to the generation of Femtosekundenimpulsen with high power and in particular a system, an oscillator, an amplifier, a compressor and a frequency converter to the generation of Femtosekundenimpulsen the used.

Techniques to the generation of short and ultrakurzen optical pulses with light waveguides are already known since some years and are recently on many fields applied. For example as into the Clark issued US-5 530,582 disclosed are and as by A. Hariharan and. A. into "alexandrite pumped alexandrites regenerative more amplifier for femtosecond pulses to amplification", "optics Letters", Bd. 21, S. 128 (1996) reported ultrakurze optical pulses as Injektionsquellen used. The injection linking ("injection seeding") of high-gain amplifiers draws as by Clark and Hariharan described substantial from impulse wavelengths use, which lie in the region of bottom 1.2  $\mu$ m. Similar limitations apply to many other at present tracked applications of ultrakurzen pulses, for example with the THz generation (as by W. Think in "Two photon excitation in functional biological imaging", "journal OF Biomedical optics", Bd. 1, S. 296 (1996) reported) or in the confocal microscopy (as by van Exter and. A. in "Terahertz time domain spectroscopy OF water vapor", "optics Letters", Bd. 14, S. 1128 (1989) reported). Such wavelengths can by frequency doubling of the pulses from a ultraschnellen erbium light waveguide oscillator (as by Clark and L.E. Nelson and. A. in "Efficient frequency doubling OF A femtosecond fiber laser", "optics Letters", Bd. 21, S. 1759 (1996) proposed) generated, D become. h. an oscillator, the pulses in the order of magnitude of 100 telex generated, or alternatively of fiber-optic cable amplifier systems (as by Hariharan proposed). However none of these publications teaches that the efficiency of the frequency doubling by a limitation of the spectral acceptance and/or. Tolerance range of the doubling crystal optimized will can.

In addition none of these publications teaches that an excellent efficiency also by implementation of oscillator and/or. Amplifier drafts with nonlinear amplifiers or by implementation of oscillator and/or. Amplifier drafts with nonlinear compressors obtained will can.

▲ top

Before the impulse amplifier or - compressor of used pulses derived do not have to become by a fiber-optic cable oscillator, as in the previously mentioned publications of Clark and Hariharan described became. Alternatively pulses from optical large mechanisms can (see Islam and. A.: "Broad bandwidths from frequency shifting solitons in fiber", "optics Letters", Bd. 14, S. 379 (1989)) or diode lasers (see Galvanauskas and. A.: "Generation OF femtosecond optical pulse with nano-joules energy from A diode laser and fiber based system", "Applied Physics Letters", Bd. 63, S. 1742 (1993) and Ong and. A.: "Subpicosecond soliton compression OF gain switched diode laser of pulse using on erbiumdoped fiber more amplifier", "IEEE journal OF quantum Electronics", Bd. 29, S. 1701 (1993)) used become. It is noted that the systems disclosed by Clark and Hariharan use linear amplifiers, and not proposed becomes that pulses of a nonlinear amplifier become derived. In addition the systems disclosed by Islam, Galvanauskas and Ong do not use a frequency doubling.

Beyond that the generation of the shortest possible pulses with systems requires only with oscillators, as by Clark, Nelson and. A. disclosed, typically complicated cavity designs with relative high optical losses, which are therefore not very effective with the generation of a maximum output power for a certain pump power.

Regarding the compression techniques with systems to the generation of ultrakurzen optical pulses there are two possibilities: the use of a light waveguide with positive dispersion (no Solitonwelle the allowed), as into the Kafka issued US-4 913,520 as well as by Tamura and. A.: "Pulses compression using nonlinear evolution pulses with reduced optical wave breaking group velocity dispersion" normal in erbium doped fiber amplifiers with, "optics to Letters", (1996) disclosed; or the use of light waveguides with negative dispersion (a Solitonwelle the allowed), as by Islam and. A. disclosed. It becomes also on "peak power Fluctuations In Optical of pulses Compression" by Kafka and. A., "IEEE journal OF quantum Electronics", Bd. 24, S. 341 (1988) referred. Although light waveguides with positive dispersion require such light waveguides additional linear impulse compressors, which prevent a design with low costs in principle for the generation of pulses of less than 10 telex used to become to be able. On similar manner the raman effect cannot become generally used with compression techniques with a light waveguide with positive dispersion, since the effects of the Ramanumwandlung become adverse appreciated (see Kafka).

Therefore impulse compressors on basis of light waveguides with negative dispersion become preferred despite the fact that the generated pulse width is typically prolonged as 10 times, since such fiber-optic cable compressors can be sketched in such a manner that they are not based on external linear impulse compressors. Beyond that such compressors can become in such a manner developed that they pull an advantage from the RAM on natural frequency shift with light waveguides, which is inclined to the spectrum of the compressed pulse more other to widen (see Islam and. A.).

This can lead however to the generation of a blackout pulse with low level in the desired compressed pulse, which with many applications of ultraschneller optic starting from  $\Delta P/N=4$  is traglich. In contrast to this the spectral development of the Ramanimpulses useful is, there it a certain extent at tunability allowed (see Islam and. A.). Such impulse compressors are appended described as Soliton Raman compressors (SRC).

An early system implementation of a Soliton Raman compressor with an erbium fiber-optic cable amplifier became by K. Kurokawa and. A. in "Wavelength dependency amplification characteristics OF femtosecond erbium doped optical fiber amplifiers", "Applied Physics Letters", Bd. 58, S. 2871 (1991) described. However generated in the system a diode laser "linking" disclosed therein - pulses for the Soliton Raman amplifier.

An other system implementation of a Soliton Raman compressor with an erbium fiber-optic cable amplifier, which is based on an unpractical strong laser signal and pump sources, became through I. Y. Krushchev and. A. in "amplification OF Femtosecond of pulse in it  $\Delta P/N=3$  - doped single mode optical fiber", "Electronics Letters", Bd. 26, S. 456 (1990) reported.

The first implementation of a Soliton Raman compressor with an erbium amplifier using a fiber-optic cable laser as linking became by Richardson and. A. in "passive one all fiber SOURCE OF 30 times of pulse", "Electronics Letters", Bd. 28, S. 778 (1992) and in "Amplification OF femtosecond pulse in A passive all fiber soliton SOURCE", "optics Letters", Bd. 17, S. 1596 (1992) described. However implement in the publications by Islam and. A., Galvanauskas and. A., Ong and. A., Kafka, Tamura and. A., Kurokawa and. A., Khrushchev and. A. and Richardson and. A. disclosed systems no frequency conversion using a nonlinear amplifier system to the generation of a frequency-doubled wavelength.

In addition see in the publications of Islam and. A., Galvanauskas and. A., Ong and. A., Tamura and. A., Kurokawa and. A., Khrushchev and. A. as well as Richardson and. A. no control of the polarization condition of the Soliton Raman compressor forwards. At present Soliton Raman compressors draw a use from the Raman effect in light waveguides, which depends again on the polarization state of the light in the light waveguide and the fiber-optic cable birefringence, as by Menyak and. A. in "Raman effect in optical fiber", "optics Letters" birefringent, Bd. 16, S. 566 (1991) disclosed is. Beyond that a nonlinear polarization development in high-grade nonlinear Soliton Raman compressors can take place, as by Fermann and. A. in "optics Letters", Bd. 19, S. 45 (1994) reported became. Therefore a reproducible and stable Soliton Raman compressor without polarization controller cannot become constructed.

▲ top

The publications listed in the preceding portion do not teach also, how the efficiency of Soliton is to be maximized RAM on compressors general and how the pulse energy - of the compressed pulses generated with the Soliton Raman compressors is to be maximized. There the doubling effectiveness like periodic poled LiNbO<sub>3</sub> (PPLN), receiptable with uncritically phaseadapted doubling crystals, major of the pulse energy depends and critical on the pulse width does not depend, with use on confocal focus, is the maximization of the pulse energy an unique critical point.

In the managing publication of Richardson and. A. became proposed that an indefinite control of the fashion-large of a fiber-optic cable oscillator and a fiber-optic cable amplifier can lead to the generation of the shortest possible pulses. However a maximization of the pulse energy of a such system can produce an actual higher power with the frequency-doubled wavelength.

As alternative to Soliton Raman compressors an adiabatic Soliton gain is discussed to the impulse compression (see E. M. Dia. November and. A., "optics Letters", Bd. 14, S. 1008 (1989)). Generally the adiabatic state requires that the gain coefficient is smaller alpha per Solitonperiode substantial as 1. In this case is the Solitonperiode of the Solitons with  $L_d \approx 0.5 \times \beta_2 / \text{rope}^2$  defined, whereby rope is the FWHM (full width, half maximum) pulse width of the Solitons and the  $\beta_2$  the group velocity dispersion of the light waveguide. Alternative one must become with an adiabatic Soliton gain the disruption of the basic Solitonwelle with  $N = 1$  into a Solitonwelle with  $N = 2$  prevented. Since the energy of a Solitonwelle with  $N = 2$  for the same pulse width is four times higher as for a Solitonwelle with  $N = 1$ , the gain should be smaller g per Solitonperiode as approximate 2. Consequently typically amplifier-prolonged of some 10 m up to several km length must become used, which practical is not. On similar manner the pulse energy can be smaller after such prolonged fiber-optic cable-prolonged compared to what with short amplifiers possible is, because of nonlinear effects of higher order in the light waveguide.

As other alternative to Soliton Raman compressors Femtosekunden pulses can become by Chirpimpuls gain (CPA) with light waveguides amplified, as by Minelly and. A. in "optics Letters", Bd. 20, S. 1797 (1995) and in the Galvanauskas and. A. issued US-5 499,134 disclosed is. However typically so no impulse impulsverkurzung, but rather an impulse widening becomes because of the limited bandwidth of the gain medium and the impulse

compression and Impulsdehnung used gratings obtained. Therefore such systems are less useful, so long the pulse energy approximate few nJ achieved.

In by Minelly and. A. described system became a double clad-core optical fibre, D. h. a light waveguide with twin a gradation diffraction index profile as light waveguides implements. Therefore coat pumps (as into the Kafka issued US-4 829,529 disclosed) to the delivery of the pumping light into the fiber-optic cable amplifier one implemented. As in the publication by Minelly and. A. taught can become the fashion-large of the single fundamental mode in such light waveguides increased, during a simultaneous high concentration of the dopant solvent (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with Minelly and. A. is maintained), that the index increased. Again an high concentration of a dopant solvent knows the solubility of a dopant (it< 3+> with Minelly and. A.) increase, which can lead to an high quantum efficiency for a such amplifier.

However teach Minelly and. A. not that the performance of such light waveguides can become the Femtosekundenimpuls gain optimized by arranging the pumping light direct into the core to implement in place of coat pumps.

As alternative to the Chirpimpuls gain also a linear gain of short optical pulses in considerations can become drawn. Whether an amplifier can become as linear or nonlinear viewed, depends on the nonlinear phase delay PHI n1 caused by the amplifier. If one accepts a linear increase of the pulse energy with the fiber-optic cable-prolonged with a satisfied amplifier and a reinforcement rate of substantial more than the adiabatic state, the nonlinear phase delay PHI n1 of a pulse is approximate given with an amplifier of the length L through

EMI7.1

whereby n2 the nonlinear refractive index,  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ W}^{-1}$  for silicon glass, A the core-flat, lambda the signal wavelength and rope the pulse width is. In this barrier a dispersion-free gain with a stage became assumed; for a gain with two stages L/2 becomes replaced by L. Conventional laser amplifiers are typically in such a manner developed that they produce a good impulse quality with a signal wavelength, which a development for an amplifier with PHI n1 < 5 implies.

It is noted that the problem of the polarization controller can become with a Nichtpolarisation receiving light waveguide by implementation of Faraday rotation mirrors (FRMs) minimized. Preceding uses of Faraday rotation mirrors were actual however limited on linear light wave laser amplifiers, as in the Duling and. A. issued US-5 303,314 disclosed, or only on ultraschnelle Femtosekunden Lichtwellenleiterlaser, like in the previously mentioned publication by Fermann and. A. disclosed.

On all of the previously mentioned articles and patent specifications is hereby referred to the reference.

Shortly the invention is the basis the object to convert short optical pulses with a signal wavelength (SW) optical pulses with a frequency-doubled wavelength (FDW). A system exhibits according to invention a kurzimpuls oscillator, an amplifier, a compressor and a frequency converter, whereby the amplifier and the compressor the high-grade nonlinear its and procedure of the gain and compression in an optical unit combined to become to be able. The implementation of a frequency transformation procedure the allowed use of very high-grade nonlinear amplifiers or compressors with a signal wavelength (SW) without entering compromises regarding the impulse quality with a frequency-doubled wavelength (FDW).

▲ top

The development of the oscillator, the amplifier as well as the compressor can be regarding the energy more effective as developments only with basic oscillators, there the generation of the shortest possible pulses from oscillators of typically complicated cavity designs with relative high optical losses included, which are not very effective therefore with the generation of a maximum possible output power for a certain pump power. Beyond that the allowed implementation of a nonlinear amplifier/pulse compressor the use of oscillator linking impulses with significant longer pulse widths than with techniques only with oscillators to the receipt of a finally certain ultrakurzen pulse width. This allowed again a simplification of the oscillator draft and leads to a substantial reduction of costs for the system.

A special system implementation exhibits a kurzimpuls fiber-optic cable laser oscillator, a fiber-optic cable amplifier, a Soliton Raman compressor (SRC) and a nonlinear crystal (numerical control), whereby a nonlinear frequency conversion major arises with the nonlinear crystal. By a prudent design of the Soliton Raman of compressor and an appropriate choice of the nonlinear crystal the efficiency of the transformation procedure becomes maximized, and the nearly range-limited pulses with the frequency-doubled wavelength become even generated with pulses low quality with the signal wavelength.

The Soliton Raman compressor becomes by control its polarization state and its dispersion characteristics by use of light waveguides with large fashion values and by control of the value of the RAM on displacement with the amplifier optimized.

In accordance with an embodiment of the invention the fiber-optic cable amplifier with the Soliton Raman compressor becomes combined, whereby the efficiency of the amplifier can become optimized by implementation of light waveguides with double stage profiles of the refractive index. Long-term shifts of the polarization condition become avoided by use of a Faraday rotation mirror (FRM) in compound with an amplifier and a Soliton Raman compressor. Alternative one can become the use of a polarization-receiving, erbium-doped light waveguide for the

amplifier and the Soliton Raman compressor used.

Demonstrated becomes according to invention that a frequency conversion major cannot only be implemented for the compressed part of the pulses outgoing from the Soliton Raman compressor, whereas the uncompressed impulse part in the nonlinear frequency transformation procedure can become suppressed. In addition the efficiency of the nonlinear frequency conversion can become optimized by selection of a nonlinear procedure with an acceptance range, which is as small as the bandwidth of the pulses outgoing from the Soliton Raman compressor.

In accordance with another embodiment of the invention the allowed RAM on displacement with the Soliton Raman compressor and the implementation of a nonlinear frequency transformation procedure a limited tunability of the frequency-doubled wavelength.

In accordance with an other embodiment of the invention pumping light direct becomes into the fiber-optic cable core double coat of a light waveguide pumped, so that an advantage can become from the fact drawn that the pumping absorption is higher in the fiber-optic cable core as the absorption in the cladding around a factor, which is proportional to the ratio (surface of the inner shell)/(core-flat). This arrangement the allowed use of shorter amplifier light waveguides than this with coat pumps possible is, which again the nonlinearity of the amplifier to the gain of Femtosekundenimpulsen minimized.

Finally the performance of a fiber-optic cable amplifier/frequency converter arrangement of source/impulse according to invention can become by selection of nearly range-limited sources of impulse optimized with matching at confocal applications of microscopy, which produce relative prolonged pulses, so that a nearly linear gain becomes allowed with the fiber-optic cable amplifier.

The invention becomes appended reference bottom on the basis the preferred embodiments on the drawing more near described. Show:

Fig. 1 a double stage configuration of the device according to invention,

Fig. 2 the diffraction index profile of the amplifier in accordance with the first embodiment,

Fig. 3 an interferometric autocorrelation of the frequency-doubled, optical pulses in accordance with the first embodiment of the invention,

Fig. 4 the spectra of the pulses in accordance with the second embodiment of the invention, outgoing from the Soliton Raman compressor with different temperatures of the PPLN,

Fig. 5 the lowered spectral-wide with the oscillator and with the amplifier because of the own phase modulation with the amplifier, if the pump power is reduced,

▲ top

Fig. 6 a single stage configuration of the device according to invention,

Fig. 7 an embodiment according to invention, with which opposite direction pumps used becomes,

Fig. 8 an embodiment according to invention, with which a fiber-optic cable amplifier exhibits two endowment levels and an undoped fiber-optic cable section,

Fig. 9 an embodiment according to invention, becomes used with which a double coat amplifier light waveguide,

Fig. 10 an embodiment according to invention, becomes used with which a multi-fashion fiber-optic cable amplifier,

Fig. 11 a block diagram of the invention,

Fig. 12 a block diagram of the invention, become used with which a linear amplifier and a nonlinear compressor, and

Fig. 13 another block diagram of the invention.

Appended three preferred embodiments of the invention described become only exemplary. The object of the system in accordance with the first embodiment consists of it maximizing the average power with the frequency-doubled wavelength (FDW) without entering compromises regarding the pulse width. The object of the system in accordance with the second embodiment consists of maximizing the average power in particular with the frequency-doubled wavelength to the optimization of the efficiency to the use of the frequency-doubled wavelength with confocal microscopy. The object of the system in accordance with the third embodiment consists of minimizing the required pump power for the fiber-optic cable amplifier of the system.

Fig. 1 represents the configuration of a high speed Femtosekunden Impulserzeugungssystem in accordance with a first embodiment according to invention. In accordance with Fig. 1 a generated fiber-optic cable oscillator of 10 linking impulses. The fiber-optic cable oscillator 10 can be for example an erbium light waveguide stable in the environment, which works at a wavelength of 1,5  $\mu\text{m}$ . A such fiber-optic cable oscillator became in the previously mentioned publication of who man and. A. disclosed. The fiber-optic cable oscillator 10 can produce range-limited pulses of 300 telex with a repetition rate of 50 MHz with an adjustable average output power from 1 to 5 mW. Preferably the pulses are linearly polarized.

It is noted that the linking impulses from a fiber-optic cable oscillator generated to become to have; alternative can become pulses from optical large mechanisms or diode lasers used. From the perspective of the costs pulses are to be preferred either from a diode laser or from a fiber-optic cable laser oscillator. Generally expected becomes the fact that a fiber-optic cable oscillator cleaner and shorter pulses generated which for it is favourable so that a more effective nonlinear impulse compression takes place. Since the application of ultraschnellen pulses requires as much impulse achievement as possible regarding an optical design, which is to be manufactured easy, the use of amplifiers can be also very effective, which combine the procedure of the pulse regeneration and the impulse compression.

With the system in accordance with the first embodiment pulses with an average power of 2 become mW into a Soliton Raman compressor (SRC) - erbium fiber-optic cable amplifier 11 over an isolator 12 for the signal light with 1,5  $\mu\text{m}$ , a following polarization beam splitter 13 as well as two wave plates 14 and 15 coupled, which become the rear polarization beam splitter 13 for adjustment the polarization condition of the signal light used entered into the amplifier light waveguide 11. (On the left of the polarization beam splitter 13 in Fig. 1) wave plate shown 21 the optimized throughput to the polarization of beam splitter 13, the wave plate 22 the optimized polarization state in (appended described) the PPLN 20, and a lens system 23 couples the signal light into the amplifier light waveguide 11. The entire launch efficiency of the oscillator 10 to the amplifier light waveguide 11 becomes controlled by the suitable use of fashion-adapted lenses, and an efficiency of 70% or more (up to 100 - %) can become achieved.

In accordance with the first embodiment the amplifier light waveguide 11 maintains the Nichtpolarisation and exhibits one it < 3+ > - endowment levels of 0,1 molecule per cent and a double stage profile of the diffraction index. The diffraction index profile of the amplifier light waveguide 11 is in Fig. 2 shown. The inner core exhibits a numerical aperture (WELL) APPROX 0.12 and a diameter of approximate 8  $\mu\text{m}$ . The outside core exhibits a diameter of approximate 25  $\mu\text{m}$  and a numerical aperture of 0,18. It is noted that the pumping light can become direct into the inner core of the amplifier light waveguide 11 directed. The amplifier light waveguide 11 becomes by a pump 16 at 1,48  $\mu\text{m}$  over a wavelength multiplex (WDM) coupler 17 pumped, whereby the pumping light becomes passed over a broadband insulator, so that a loss of the high speed signal light becomes prevented with 1,5  $\mu\text{m}$ . After the WDM coupler 17 a pump power of 100 mW into the amplifier light waveguide 11 coupled becomes. In accordance with the first embodiment the length of the amplifier light waveguide amounts to 11 approximate 2.5 m; the whole length of the WDM light waveguide used for signal light propagation is limited on 0,50 m. Although Fig. 1 a dispersion-compensating light waveguide 18 does not represent, which becomes appended more near described, must the system in accordance with the first embodiment dispersion-compensating light waveguide use.

In accordance with the first embodiment it acts with the amplifier light waveguide 11 light waveguide doped around < one > it 3+ -. The amplifier light waveguide 11 can be however any with < ErYb > +, Pr, TM, Ho of doped light waveguides or a light waveguide doped with rare earths, which are combined with a suitable oscillator. In addition the amplifier light waveguide serves 11 in accordance with the first embodiment also as the Soliton Raman compressor; however the amplifier and the Soliton Raman can be compressor separate components.

In accordance with Fig. 1 can become a structure of double stage the signal light amplification used. With the structure of double stage it is favourable to implement a Faraday rotation mirror (FRM) 19 at an end of the amplifier light waveguide 11. The polarization state of the light at the output of the amplifier light waveguide 11 is then vertical to the polarization state with the input, why the previously mentioned polarization beam splitters 13 for almost 100% efficiency of the output coupling of the amplified light can become from the system used. Although a Faraday rotation mirror in Fig. 1 shown is, can each fiber-optic cable polarization control means or one lambda /4-Wellenplatte used become.

It is noted that even with the presence of the desired nonlinear frequency shift with the amplifier light waveguide 11 the adjustments of the two wave plates 14 and 15 permit a very effective output coupling of the amplified light with the input of the amplifier of light waveguide 11. In addition an allowed adjustment of the wave plates 14 and 15 an optimization of the Soliton Raman compressor by control of the polarization condition in the light waveguide and by control of a nonlinear polarization development in the amplifier light waveguide 11.

In studies accomplished with the system in accordance with the first embodiment the rear double stage of the amplifier light waveguide 11 an average output power of 30 mW (pulse energy of 600 pJ) measured became. When replacing the linking signal pulses with a CW (Continuous Wave) signal with the same average signal level an average power of up to 37 mW from the amplifier light waveguide 11 removed became. The energy loss of 20% with pulsed gain develops from the RAM on displacement of the amplified pulses with the signal wavelength (SW). In accordance with the first embodiment the RAM on displacement amounts to 20 nm, which shifts the signal pulses outside of the reinforcement range of erbium. Beyond that optical losses can become because of the limited bandwidth that optical elements (WDM coupler etc.) caused, which by the amplified pulses one meets.

In accordance with Fig. 1 the amplified and compressed pulses on a length of 0.8 mm of periodic poled LiNbO3

(PPLN) become 20 frequency-doubled, whereby a confocal focus becomes used. In accordance with this example the PPLN is 20 not coated with ACRE. The polarity period of the PPLN becomes set on 19,25  $\mu\text{m}$ , which with the maximum of the spectrum of the compressed pulse from the Soliton Raman compressor approximate coincident selected becomes. The heating of the PPLN 20 on temperatures between 50 DEG C to 150 DEG C can become the fine tuning of the optimum frequency doubling wavelengths as well as the prevention of a photorefractive damage with the PPLN 20 used. The length of the PPLN becomes the generation of a frequency doubling range of a size  $\alpha$  selected, which is more comparable along or a small as the bandwidth of the compressed pulses from the Soliton Raman compressor. It is however noted that the spectral acceptance range of the PPLN can be much small with the signal wavelength as the value of the spectrum with the signal wavelength without a punishment regarding the entire doubling efficiency. The PPLN converts the frequency of a signal wavelength spectrum outside of its nominal acceptance range effective. This is to be due to a nonlinear procedure, which is similar to a sum frequency production, which arises like appended described with the PPLN. This stands in the contradiction to a frequency converter draft, as it in the previously mentioned publication of Nelson and. A. described is not, points the mentioned, which are based on the finite acceptance range of a frequency converter crystal.

The frequency-doubled pulses exhibit a wavelength of 790 nm, an average power of 6,3 mW, a pulse width of 120 fs and a time range product of 0,66, if one accepts a Gauss-shaped pulse shape. Therefore the resultant pulses lie themselves within a factor of 50% of the range border. An interferometric autocorrelation of the pulses is in Fig. 3 shown, those the good quality of the pulses illustrated. It is noted that by change of the polarization condition before the amplifier light waveguide 11 of the Soliton Raman compressor a change of the measured, frequency-doubled power between 0,1 and 6,3 mW observed becomes, which the requirement of the polarization controller with this high-grade nonlinear amplifier illustrated.

The resultant transformation efficiency from pumping light to Femtosekundenimpulsen with the frequency-doubled wavelength behaves therefore 6.3%. In contrast to this the transformation amounts to efficiency from signal light to frequency-doubled light 21%. Therefore the Soliton Raman compressor exhibits a compression efficiency of approximate 60%, which with results compared can become very favourable, which are more achievable with fiber-optic cable compressors with positive dispersion, as those, which are in the previously mentioned US-4 913,520 disclosed.

These test results became obtained by implementation of an amplifier with a large core diameter the maximization of the energy, of the compressed pulses outgoing from the Soliton Raman compressor. For a pulse with a fixed width  $\tau$  rises the Solitonenergie  $W$  proportional to fiber-optic cable-core-flat  $A$  and the fiber-optic cable dispersion  $\beta_2$ . There the Soliton Raman compressor a solitonähnlichen pulse generated, an allowed maximization of the core-flat  $A$  a maximization of the generated Soliton pulse energy from the Soliton Raman compressor. In addition a minimized large core diameter also the fiber-optic cable transverse electromagnetic wave dispersion, which again the total fiber-optic cable dispersion  $\beta_2$  maximized. Although the latter is only a secondary effect, increased it the other pulse energy.

It is noted that the signal the rear double stage of the amplifier light waveguide is smaller 11 actual as after a single stage. Apart from by the large value of the RAM on displacement the amplifier light waveguide 11 also an excess length,  $D$  has caused energy losses, which arise in the amplifier light waveguide 11. h. most of the pumping light becomes the time absorbed, that it the linking end of the amplifier light waveguide 11 achieved. Therefore the amplifier at this end is not complete inverted, and a signal loss arises with the signal wavelength.

▲ top

Appended one becomes the second embodiment of the invention described. The development criteria for the system in accordance with the second embodiment become major fulfilling the requirements of a confocal two-photon imaging system selected. It is assumed that the frequency-doubled wavelength (approximate 800 nm in accordance with these examples) becomes used as sources for the two-photon excitation. It can become shown that the number of photons generated by the two-photon excitation for a fixed beam diameter is  $M$  proportional too:

#### EMI18.1

whereby a constant,  $P$ ,  $f$ ,  $\tau$  rope the average power, the repetition rate and the FWHM pulse width of the exciter const is. In accordance with equation 2 it is more important unique to increase the average power to reduce as the pulse width for an effective, confocal two-photon image. It is however noted that with actual biological systems both damage threshold values and views of photo bleaching can insist on impulse achievement, - energy and - wide based biological specimens, which are not considered by equation (2). With the description of the second embodiment the maximization of the average power becomes described with the frequency-doubled wavelength however without consideration of the damage or of points of photo bleaching.

In Fig. 1 illustrated arrangement can become also on the second embodiment applied. The second embodiment differs from the first embodiment in the fact that an oscillator achievement becomes from 4 mW used. The amplifier light waveguide 11 is similar as in accordance with the first embodiment; however the numerical aperture of the inner core is on approximate  $WELL = 0.10$  lowered and the size of the inner core on approximate 10  $\mu\text{m}$  increased. In addition the he endowment level is around approximate 25% on approximate 750 ppm reduced. The length of the amplifier of light waveguide 11 amounts to 2.6 m and becomes in such a manner selected that it the highest average power for a linear operation of the amplifier generated (D. h. by use of a CW-signal of 4 mW as linking). The length of the PPLN 20 becomes increased on 1.2 mm, so that the length of the pulses becomes increased with the frequency-doubled wavelength; the period of the PPLN 20 becomes reduced on 18,75  $\mu\text{m}$ , so that an effective frequency doubling becomes at 1,56  $\mu\text{m}$  allowed. In studies a generated double stage of the linking impulses over the amplifier light waveguide 11 54 mW with the signal wavelength, whereas a double stage of

a CW-signal a power of 57 mW with the signal wavelength generated, accomplished with the system in accordance with the second embodiment, D. h. a signal loss of only 5% became caused by the nonlinear operation of the amplifier. It was found out that the spectrum from the Soliton Raman compressor of outgoing pulses in the center at  $1,56 \mu\text{m}$  (as in Fig. ) was appropriate for 4 shown. It was found out that the pulses with the frequency-doubled wavelength a wavelength of approximate 780 Nm, an average power of 12 mW, a pulse width of 190 tex with a spectral-wide within 50% of the range border to exhibit. A change of the polarization before the Soliton Raman compressor amplifierlight waveguide 11 a generated change of the power with the frequency-doubled wavelength between 7 to 12 mW. The resultant transformation efficiency with the frequency-doubled wavelength behaves 22%, which reflection losses considered, and the transformation efficiency rises to 29%. Compared to the system in accordance with the first embodiment the number of photons becomes M around a factor of 2,2 increased.

The high power with the frequency-doubled wavelength in accordance with the second embodiment is a result of the optimization of the linear amplifier efficiency and the limitation of the RAM on displacement of the pulses on wavelengths in the vicinity of the wavelength of the oscillator impulses (within approximate 10 Nm in accordance with this example). This stands contrary to by Richardson and. A. in "amplification OF femtosecond pulse in A passive all fiber soliton SOURCE" (managing discussed) reported system, became used in which a RAM on displacement of 30 Nm. The pulse width of the Raman Solitons in accordance with the second embodiment is unique more prolonged as that in accordance with the first embodiment. Actual one cannot become because of the reduced nonlinearity of the amplifier the Raman Soliton complete developed, and an impulse compression can develop because of a large scale of a Soliton compression of higher order. Paths of the relative insensitiveness of M on the pulse width generated however the system in accordance with the second embodiment a higher M than for the first embodiment.

The high frequency transformation efficiency obtained in accordance with the first and second embodiments is also to the exploitation of a more general frequency transformation procedure than being due only frequency doubling. The verification of the presence of a such nonlinear frequency transformation procedure the temperature of the PPLN became 20 changed, while the spectra became with the signal wavelength and measured with the frequency-doubled wavelength. The results are in Fig. 4 shown. It is noted that because of the presence of a Soliton compression with higher order the spectrum becomes divided with the signal wavelength into two parts with a depletion in the center of the spectrum, which corresponds to the location of the spectrum of the injected oscillator impulse. With  $T = 162 \text{ DEG C}$  a frequency conversion major with the ramanverschoben wavelength obtained becomes; with  $T = 100 \text{ DEG C}$  a frequency conversion becomes at point of depletion obtained, whereas with  $T = 25 \text{ DEG C}$  a frequency conversion major at the blue end signal wavelength of the spectrum obtained becomes. It became observed that the transformation efficiency is highest with a frequency-doubled wavelength at point of depletion, which unique cannot become alone with a simple generation second harmonics of an explained. A rather generated procedure like a sum frequency production the frequency-doubled wavelength. However at present the precise physical origin of this phenomenon is not known. Some possible explanations are: the resonance nature of the frequency doubling procedure with the PPLN, effects because of the Impulschirps, effects because of the cascaded nonlinearities of second order in the crystal or straight effects because of the imaginary part of the nonlinearity of second or third order of the PPLN 20 or an interaction between nonlinearities of higher order in the PPLN 20. Appended one becomes to this nonlinear procedure simple as hum-frequency-produce-similar frequency conversion (SLF) reference taken.

▲ top

In accordance with the second embodiment experimental observed became that the hum-frequency-produce-similar frequency conversion the use of a nonlinear crystal (numerical control) with a doubling range allowed, which is a substantial small as the bandwidth of the Soliton Raman compressor without a compromise regarding the transformation efficiency with a frequency doubling wavelength. This is useful, there it the control of the pulse width of the pulses of the frequency doubling wavelength without a compromise regarding the power with the frequency doubling wavelength allowed. With other words the nonlinear crystal knows the power with the signal wavelength effective into a frequency doubling wavelength by removal of energy from the largest part of the spectrum with the pulses with the signal wavelength (D. h. from a spectrum, which is large as the spectral acceptance range of the nonlinear crystal); therefore pulses can become with the signal wavelength from relative poor quality to the effective frequency conversion used. This is a valuable feature for the development of each amplifier/frequency converter arrangement, there this feature an effective frequency conversion not only with a single signal wavelength, but in one within the entire spectral region of the signal wavelength in accordance with Fig. 4 tunable wavelength range possible.

It is informative to compute the nonlinearity of the managing described amplifier using equation (1). For an entered pulse width rope of 300 tex and a pulse energy of  $E = 1.2 \text{ nJ}$  becomes  $\text{PHI n1} = 16.6$  obtained. Therefore even high-grade nonlinear amplifiers (compressors) can produce pulses with very much high quality, as soon as a frequency-doubled wavelength becomes used. This principle became by the previously mentioned publications of Clark and Nelson and. A. not proposed.

In addition it is informative to compare the performance with a linear amplifier. Compared to a linear amplifier the pump power becomes the receipt of an amplified pulse energy of 400 pJ reduced, which leads to  $\text{PHI n1} \text{ APPROX } 5$ . The spectral-wide decreases to paths of the own phase modulation with the amplifier from approximate 8.2 Nm (tip) with the oscillator to 5,7 Nm with the amplifier (down), as in Fig. 5 shown is. In accordance with Fig. 5 like an expected higher spectral quality of amplified pulses with "linear" amplifiers obtained becomes.

Appended one becomes the system in accordance with the third embodiment described. In Fig. 1 illustrated arrangement becomes also applied on the third embodiment. In accordance with the third embodiment an oscillator stable in the environment becomes used, the pulses of 50 pJ with a repetition rate of 5 MHZ generated. The pulses



have a bandwidth of 20 nm and are positive chirped, D. h. the Chirp can become with a length of approximate 8 metres a Solitonlike of permitting light waveguide (Corning SMF28) compensated. After the implementation of a Chirp compensation observed became that the measured pulse width amounts to with the signal wavelength 190 nm (if one a Gauss form assumes), D. h. nearly range-limited pulses can become after a Chirp balancing obtained in this way.

The development of the amplifier system in accordance with the third embodiment is similar described to those in accordance with the first and second embodiments apart from the subsequent exceptions. The amplifier light waveguide 11 exhibits a numerical aperture of approximate 0.16 and a core diameter of approximate 6  $\mu\text{m}$ . The amplifier-prolonged amounts to 1.1 m. Into the amplifier 90 becomes mW pumping light with 980 nm pumped. A dispersion-compensating light waveguide 19, which is a part of a communications light waveguide standardized by several metres (Corning SMF28), becomes inserted between the wave multiplexed coupler 17 and the Faraday rotation mirror 19 the dispersion compensation. The whole length of the light waveguide between the input and the output of the amplifier system, becomes set over which the transmitted signal light, becomes the receipt of an optimum dispersion compensation of the oscillator impulses set. This optimization can become by pairs of the pulse width of the pulses with a autocorrelator and an adjustment of the length of the inserted, standardized communications of light waveguide, outgoing from the amplifier, verified, until, a minimum pulse length outgoing from the system becomes obtained. During the dispersion adjusting phase the pump power becomes reduced with the amplifier on a level, become minimized with which any nonlinear procedures in the amplifier, so that no RAM on displacement of the signal becomes observed.

In accordance with the third embodiment the development of the frequency doppler system is identical with the preceding embodiments, but the PPLN 20 with a length of only 600  $\mu\text{m}$  becomes used. The system in accordance with the third embodiment has the advantage that the dispersion of the amplifier system on zero can become set and easy controlled, which useful is with the receipt of the shortest possible pulses from the Soliton Raman compressor. Since the pulses are strong over the whole length of the amplifier chirped, any nonlinearities arise only in the final part of the amplifier, which with the receipt of the highest possible output signal energy from the Soliton Raman compressor is favourable.

With the system in accordance with the third embodiment the signal pulses become on a power of 4 mW amplified (a pulse energy of 800 pJ/Impuls). After the frequency doubling pulses of 100 become nm with an average power of 1 mW experimental with 790 nm obtained. It became determined that the time range product of approximate 0.50 amounts to, if one accepts Gauss pulses; therefore the pulses amounted to within 10 to 20% the range border. This the demonstrated beneficial effect of the dispersion attitude implemented with this system. It was found out that the efficiency of the frequency doubling amounts to 25% and is lower as that, which becomes for a range-limited signal pulse from 800 pJ expected.

With all that managing described embodiments relative high erbium endowment levels are implemented between 700 to 1500 ppm despite the decrease of the quantum efficiency of these types by amplifiers compared to lower endowment levels. These high endowment levels permit a minimization of the used amplifier-prolonged. Since pulses of 1 nJ with a width of 100 nm have a peak power of 10 KW, they exhibit substantial nonlinearities with only 20 to 30 cm of light waveguides themselves for amplifiers with large core. In addition pulses of 100 become nm by dispersion of third order in the light waveguide 11 impaired. Therefore it is favourable to minimize the length of the amplifier system for the maximization of the impulse quality and to the minimization of the receivable pulse width. General one should not be the length of the amplifier system however to short, since at least the use of the Soliton compression of higher order must become ensured, so that a substantial impulse impulsverkürzung becomes possible. Case the nonlinearity of the amplifier actual to small is, leads an own phase modulation with light waveguides with negative dispersion in accordance with Fig. 5 to an impulse widening.

Additional ones to that managing described embodiments are some other embodiments of the invention possible. In particular can become a dispersion optimization or a zero-dispersion system with the systems in accordance with the first or second embodiment or any amplifier system used. A combination of a positive or negative dispersion light waveguide can become reaching a dispersion optimization used. In accordance with the first and second embodiments a positive light waveguide can do 18 with a suitable length between the wavelength multiplexed coupler 17 and the Faraday rotation mirror 19 in accordance with Fig. 1 used become.

In addition a structure of single stage can be implemented in the Soliton Raman compressor. A system implementation is in Fig. 6 shown. Making a complete polarization stability possible a polarization-receiving amplifier (PMA) can become used. The polarization of the light from the oscillator 10 becomes then aligned with one of the polarization axes of the polarization-receiving amplifier. The polarization state at the output becomes in such a manner set that it the highest doubling transformation efficiency achieved. A polarization-receiving light waveguide is however no requirement with a structure of single stage, there a combination of wave plates at the input 14, 15 and at the output 60 of the Soliton Raman compressor for the maximization of the efficiency of the frequency doubling procedure as in Fig. 6 shown used will can. However a better long-term and environment stability with a polarization-receiving light waveguide become expected. In addition also a different wavelength multiplexed coupler 61 (and 62) can be implemented. With in Fig. 6 represented wavelength multiplexed couplers 61 and 62 the pumping light becomes into the amplifier 11 over an micro-optical arrangement coupled, the dichroic mirrors included. Such wavelength multiplexed couplers can exhibit actual free space outputs, what with the minimization of any coupler lines and optical losses in amplifier systems useful is. A complete polarization-stable system requires an unique polarization-receiving light waveguide over the amplifier system. The splices between different portions of the polarization-receiving light waveguide should ensure that the polarization axes of the light waveguides are aligned.



Since it is favourable, as much pump power as having possible for the Soliton Raman compressor available, more than one pumping diode can become used. An arrangement with two pumping diodes 63 and 64 is likewise in Fig. 6 shown. A similar arrangement could become with a double stage for (not represented) the signal light used. In addition polarization beam splitters for the pumping light can be contained with the wavelength multiplexed couplers, thus the use of up to four (not represented) pumping diodes allowed become.

Additional order or the generation of Raman Solitons, higher to the Soliton compression, can become adiabatic impulse amplifiers also the shortening of the pulse width from the oscillator used. The Sicherstellung of the gain in the vicinity of the Adiabazität a against-directed, pumped amplifier system becomes as in Fig. 7 shown preferred. Gegengerichtetes pumps an allowed increase of the amplifier gain per unit length with a decrease of the pulse width with the absence of an amplifier saturation, which with the Adiabazität compatible is. The use of polarization-receiving light waveguides is favourable with such systems unique.

For applications with confocal two-photon microscopy it is also useful in the absence of limitations regarding the damage and the photo bleaching to fall back to almost linear amplifier systems to the receipt of an high value M. Again a against-directed, pumped amplifier is most useful in this case, since it the nonlinearity of the amplifier minimized, although a double stage system is likewise possible. The expected performance of a such system can become by its comparisons with the system in accordance with the second embodiment estimated. Assumed one that an optimum developed single stage amplifier of approximate 30% must be more prolonged as a two-stage amplifier, amounts to the optimum length of the amplifier approximate  $L = 3.4$  m for a single stage amplifier with a he endowment level of approximate 750 ppm. Using a PPLN crystal with a length of approximate 3 mm a pulse width of approximate 500 telex can become with the frequency doubling wavelength obtained. Since the expected small signal doubling efficiency of PPLN approximate 95%/nJ for a range-limited, sech<sup>2</sup> - formed pulse is, an entire doubling efficiency can become from approximate 40% for such pulses obtained. Therefore the linear configuration can produce a power level of 23 in accordance with the second embodiment mW with the frequency doubling waves prolonged, a value of M of 30% higher as that in accordance with the second embodiment. However considered this number not impulse widening effects with "nearly linear" amplifiers and a reduction of the frequency transformation efficiency because of the residual, small nonlinearity of such systems. Case the use of longer pulses with practical, confocal two-photon measuring systems nothing the despite compatible with limitations regarding the damage and the photo bleaching is, can longer pulses preferred become, since they simplify the measuring system because of the reduced dispersion problems within the confocal microscope. It is not noted that the critical element is with a such system a very effective amplifier with large core and an oscillator, ultrakurzen pulses the generated, but rather pulses with widths of some 100 telex. Natural one can become an arbitrary prolonged pulse width from a broadband oscillator by use of spectral filtering selected. This leads however to a power loss. As if better alternative can become a source of linking pulse used, the one pulse width of more than 500 telex generated. The use of polarization-receiving light waveguides is favourable with such systems unique.

As is the case for the first embodiment described can become excess length amplifiers with a Soliton Raman compressor the receipt of a maximum doubling transformation efficiency used. Since a very small gain in the last portion of an excess length amplifier is present there, an undoped light waveguide can become 80 in the last portion of the Soliton Raman compressor used. Then the length of the amplifier can to the receipt of an optimum signal gain and thereupon an undoped light waveguide with large core into the amplifier light waveguide to the receipt of a Soliton Raman Kompressorvorgangs to be aufgespleisst. A such arrangement for a single stage amplifier is in Fig. 8 shown. (Not more represented) a structure of double stage can be implemented likewise.

▲ top

For the maximization of the entire efficiency of the whole system amplifiers 81 and 82 with different endowment levels can (as also in Fig. 8 shown) to be implemented. Since the efficiency of typical fiber-optic cable amplifiers with a decrease of the endowment level increases with the front stages of the gain, low endowment levels for the amplifiers can be implemented; since the signal level is small with the first stages of the gain, a larger length of the amplifier with a low endowment level can become tolerated.

To the increase of the receiptable pump power for the Soliton RAM on compressor and to the minimization of the costs of the pump source can as in Fig. 9 a shown double cladde-core optical fibre 90 to be implemented. Double cladde-core optical fibres permit pumps of the system with wide strip diode assembly lasers. For the sake of simplicity only a single stage is in Fig. 9 shown. Making possible coat pumps he-doped or he-/Yb-doped light waveguide can become used. The extension on a double stage is apparent from the preceding discussion. In accordance with Fig. 9 the pump power becomes over a final coupling on a diode array 91 over a dichroic mirror 92 generated. However multi-fashion light waveguide couplers can become the embodiment of this function used. Alternative one can be also implemented that side ouples of the pump power into the double cladde-core optical fibre.

Since the Soliton Raman compressor is a high-grade nonlinear system, also the use of amplifiers or undoped light waveguides with large core is acceptable, which work easy mehrmodig. With multi-fashion light waveguides the linking conditions for the amplifier light waveguide become in such a manner selected that the fundamental mode becomes preferably coupled, although general then also modes of higher order become energized. As long as the power is higher as or more comparable in the fundamental mode with the power in all the other modes, the affected Soliton Raman compressor the fundamental mode first. The RAM on displacement of the fundamental mode can be implemented then in compound with the frequency doppler to the receipt of an almost diffraction limited output with the frequency-doubled wavelength. Again also a double cladde-core optical fibre can be implemented in a such system. Multi-fashion light waveguide 100 a using possible system implementation is in Fig. 10 shown. Fig. 10 shows a structure of single stage, but a structure of double stage is also possible. A dichroic large mirror 92 can become

the coupling of the pumping light from a laser diode 91 used. It is however noted that multi-fashion coupler complete from light waveguides also the feedthrough this function used to become to be able. On similar manner also a side coupling of the pumping light can be implemented.

In addition like the described application of a frequency transformation procedure on fiber-optic cable amplifiers or nonlinear fiber-optic cable compressors limited is not managing. In principle each type of a nonlinear amplifier can with a signal wavelength with a nonlinear phase delay  $PHI_{n1} > 5$  (like managing calculated) used become, and a frequency conversion can produce then a pulse with high quality with a frequency-converted wavelength. A such system implementation is general in Fig. 11 shown. A system implementation with an amplifier, a nonlinear compressor and a PPLN Frequenzverdoppler is in Fig. 12 shown. Natural ones can become the fiber-optic cable amplifier and the compressor into a single optical element combined. On similar manner a nonlinear amplifier and a linear or nonlinear compressor could become used.

Like described the use of a PPLN for such systems is not managing the PPLN critical phasematched particularly favourably, there is and a very effective frequency conversion allowed. The selection of a PPLN crystal or a frequency converter with an acceptance range with the signal wavelength of less than the bandwidth the source with the signal wavelength is then favourable to the generation of the pulses with the highest possible quality with the highest possible transformation efficiency.

Beyond that the principle of the use of a frequency converter with an acceptance range can become of less with the signal wavelength than the bandwidth with the signal wavelength the frequency conversion with each sources of short pulses applied. A such system implementation is in Fig. 13 shown. Like described the use of a PPLN for such systems is not managing the PPLN critical phasematched particularly favourably, there is and a control of the acceptance range simple by control of the length of the crystal allowed. A such tuning range is then by selection of the PPLN with different pole periods or more achievable by change of the temperature of the PPLN. Alternative one could become each type of a periodic poled nonlinear crystal the embodiment of the function of the frequency conversion used.

A device of generated Femtosekunden pulses from laser amplifiers by nonlinear frequency conversion. The implementation of a nonlinear frequency conversion the allowed development of high-grade nonlinear amplifiers with a signal wavelength (SW), while still a pulse with high quality is maintained with an approximate frequency-doubled wavelength (FDW). A nonlinear frequency conversion becomes also allowed for a limited wavelength tuning of the frequency-doubled wavelength. For example the output becomes from a nonlinear fiber-optic cable amplifier frequency-converted. By control of the polarization condition of the nonlinear fiber-optic cable of amplifier and by operation the Solitonwelle of permitting dispersion range of the basic glass an effective nonlinear impulse compression for the signal wavelength obtained becomes. The generated pulse width becomes optimized by use of Soliton compression with the presence of the RAM on natural frequency shift in the nonlinear fiber-optic cable amplifier with the signal wavelength. High speed of pulses becomes obtained by use of fiber-optic cable amplifiers with large core diameters. The efficiency of the nonlinear fiber-optic cable amplifier becomes by use of a double cladde-core optical fibre (D. h. a light waveguide with a double stage profile of the refractive index) and by pumps of light of direct into the inner core this light waveguide optimized. Periodic poled LiNbO3 (PPLN) becomes the effective conversion of the signal wavelength used on a frequency doubling wavelength. The quality of the pulses with the frequency doubling wavelength can be improved by nonlinear frequency conversion of the compressed and ramanverschobenen signal pulses with the signal wavelength more other. The use of the RAM on displacement continues to improve the tuning range with the frequency doubling wavelength. For applications with confocal microscopy a special linear fiber-optic cable amplifier becomes used.



## Result Page

Notice: This translation is produced by an automated process; it is intended only to make the technical content of the original document sufficiently clear in the target language. This service is not a replacement for professional translation services. The esp@cenet® Terms and Conditions of use are also applicable to the use of the translation tool and the results derived therefrom.

1. Device to the generation of optical high-power pulses, characterized through an optical source (10) to the generation of signal light, a nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) with a nonlinear phase delay, which the signal light generated by the optical source (10) receives, and a frequency converter (20), that from the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) receives spent optical pulses, whereby the frequency converter (20) the optical high-power pulses at its output generated.
2. Device according to claim 1, characterized by one between the optical source (10) and the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) disposed polarization control means (14, 15), whereby the polarization control means (14, 15) the polarization state by the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) received signal light adjusts.
3. Device according to claim 2, characterised in that the polarization control means wave plates (14, 15) exhibits.
4. Device according to claim 1, characterised in that the optical source (10) a fiber-optic cable oscillator exhibits.
5. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) an amplifier light waveguide (11; 81, 82; 100) exhibits.
6. Device according to claim 5, characterised in that of the amplifier light waveguides (11) with rare earths doped is.
7. Device according to claim 6, characterised in that of the amplifier light waveguides (11) with  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  or  $\text{Ho}^{3+}$  doped is.
- [▲ top](#) 8. Device according to claim 5, characterised in that of the amplifier light waveguides (11, 18; 81, 82; 90; 100) a numerical aperture (WELL) of less than 0.15 exhibits.
9. Device according to claim 5, characterised in that of the amplifier light waveguides (11, 18; 81, 82; 90; 100) a core-flat of more than  $50 \mu\text{m}$  exhibits.
10. Device according to claim 5, characterised in that of the amplifier light waveguides (11, 18; 81, 82; 90; 100) an impulse compression implements.
11. Device according to claim 5, characterised in that of the amplifier light waveguides (11, 18; 81, 82; 90; 100) a Soliton Raman compressor (SRC) exhibits.
12. Device according to claim 1, characterized by an impulse compressor to the compression from the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) spent optical pulses.
13. Device according to claim 12, characterised in that the impulse compressor a Soliton Raman compressor (SRC) is.
14. Device according to claim 1, characterised in that of the frequency converters (20) a periodic poled crystal exhibits.
15. Device according to claim 14, characterised in that the periodic poled crystal (20) a periodic poled lithium niobium RK crystal (PPLN) exhibits.

16. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) in a structure of double stage disposed is.

17. Device according to claim 16, characterized by a Faraday rotation mirror (19), fiber-optic cable polarization control means or a one lambda /4-Wellenplatte, those at an end of the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) disposed is.

18. Device according to claim 1, characterized by one between the optical source (10) and the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) disposed isolator (12).

19. Device according to claim 1, characterized by one at an output of the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) disposed polarization beam splitter (13).

20. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) in a structure of single stage disposed is.

21. Device according to claim 1, characterized by one with the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) over a first wavelength multiplexed coupler (17; 61) coupled first pump (16; 63), whereby the first pump (16; 63) Pumping light for the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) generated.

22. Device according to claim 21, characterized by one over a second wavelength multiplexed coupler (62) to the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) coupled second pump (64), whereby the second pump (64) pumping light for the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) generated.

23. Device according to claim 1, characterised in that of the amplifier light waveguides (11, 18; 81, 82; 90; 100) a polarization-receiving light waveguide is.

24. Device according to claim 1, characterized by one between the optical source (10) and the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) disposed first polarization control means (14, 15) and second polarization control means (60) at an output of the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100).

25. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) a against-directed, pumped amplifier exhibits.

26. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) an excess length amplifier is and an undoped light waveguide (80) at its output end exhibits.

27. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (81, 82) a first amplifier light waveguide (81) with a first doping and a second amplifier light waveguide (82) with a second doping exhibits.

▲ top

28. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) one with a diode assembly laser (91) pumped double cladde-core optical fibre (90) exhibits.

29. Device according to claim 1, characterised in that pumping light and the signal light direct into an inner core of the double cladde-core optical fibre (90) coupled become.

30. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) a multi-fashion amplifier light waveguide (100) exhibits.

31. Device according to claim 1, characterised in that of the nonlinear amplifiers (11, 18; 81, 82; 90; 100) a dispersion-compensating light waveguide (18) exhibits.

32. Device according to claim 1, characterized by a dispersion-compensating light waveguide (18).

33. Device according to claim 1, characterised in that a spectral acceptance range of the frequency converter (20) small as a value of the spectrum from the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) spent optical pulses is, whereby the frequency converter (20) energy from a portion of the spectrum from the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) spent optical pulses, which is larger as the spectral acceptance range, into which spectral acceptance range converts.

34. Device to the generation of optical high-power pulses, characterized through an optical source (10) to the generation of optical high-power pulses and a frequency converter (20), that by the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) generated optical pulses and optical high-power pulses with a frequency-converted wavelength generated receives, whereby a spectral acceptance

range of the frequency converter (20) is smaller than a value of the spectrum of the optical pulses from the optical source (10), and whereby the frequency converter (20) energy from a portion of the spectrum of the optical pulses from the optical source (10), which as the spectral acceptance range is larger, into which spectral acceptance range converts.

35. Device according to claim 34, characterised in that of the frequency converters (20) periodic poled is.

36. Device to the generation of optical high-power pulses, characterized through an optical source (10) to the generation of a signal light, an amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100), which receives the signal light generated by the optical source (10), a nonlinear compressor, that by the nonlinear amplifier (11, 18; 81, 82; 90; 100) generated optical pulses receives, and a periodic poled frequency converter (20), that by the nonlinear compressor compressed optical pulses and generated receives the optical high-power pulses with a frequency-converted wavelength.

37. Device to the generation of optical high-power pulses, characterized through a mechanism (10) to the generation of signal light, a mechanism (11, 18; 81, 82; 90; 100) to the nonlinear gain of the signal light and a mechanism (20) to the frequency conversion of by the mechanism (11, 18; 81, 82; 90; 100) to the nonlinear gain generated optical pulses, whereby the mechanism (20) to the frequency conversion the optical high-power pulses at its output generated.

38. Device according to claim 37, characterized by a mechanism (60) to the control of the polarization condition of the signal light.

39. Device according to claim 37, characterized by a mechanism to the compression by the mechanism (11, 18; 81, 82; 90; 100) to the nonlinear gain of generated optical pulses.

40. Device according to claim 37, characterized by a mechanism to the reflectance of optical pulses by the mechanism (11, 18; 81, 82; 90; 100) to the nonlinear gain, whereby a structure of double stage becomes generated.

41. Device according to claim 37, characterized by a mechanism (16; 63) to pumps of pumping light into the mechanism (11, 18; 81, 82; 90; 100) to the nonlinear gain.

42. Method to the generation of optical high speed pulses, characterized by the steps  
Produce a signal light,  
nonlinear strengthening of the signal light to the generation of amplified optical pulses and  
Convert the frequency of the amplified optical pulses to the generation of the optical high-power pulses.

▲ top 43. Process according to claim 42, characterized by the step of steering the polarization condition of the signal light.

44. Process according to claim 42, characterized by the step of compressing the optical pulses.

45. Process according to claim 42, characterised in that the optical pulses during the step of nonlinear strengthening compressed becomes.

46. Process according to claim 42, characterised in that a double cladde-core optical fibre (90) a nonlinear gain implements.

47. Process according to claim 46, characterized by the step of the launching of pumping light and the signal light direct into an inner core of the double cladde-core optical fibre (90)

48. Process according to claim 42, characterized by the step of reflecting the optical pulses by an amplifier light waveguide (11, 18; 81, 82; 90; 100), whereby a double stage configuration becomes generated.



(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 198 02 845.8  
(22) Anmeldetag: 26.01.1998  
(43) Offenlegungstag: 30.07.1998  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 10.11.2005

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **H01S 3/23**  
H01S 3/108, H01S 3/17, H01S 3/067

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:  
08/789,995 28.01.1997 US

(73) Patentinhaber:  
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US

(74) Vertreter:  
TBK-Patent, 80336 München

(72) Erfinder:  
Fermann, Martin E., Dr., Ann Arbor, Mich., US;  
Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich., US;  
Harter, Donald J., Dr., Ann Arbor, Mich., US

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
DE 197 55 361 A1  
DE 195 10 432 A1  
US 55 30 582  
US 54 99 134  
US 53 03 314  
US 53 03 247  
US 51 87 759  
US 49 13 520  
US 48 29 529  
WOLFRUM, K., LAENEN, R., LAUBEREAU, A.:  
Intense  
bandwidth- and diffraction-limited picosecond  
pulses with large tuning range. In: Optics  
Communications, Vol. 97, 1993, S. 41-46;  
ROBERTS, J.F., u.a.: Generation of 50-µJ subpico-  
second pulses at 248 nm. In: Optics Communica-  
tions, Vol. 83, 1991, S. 231-234;  
KAFKA, J.D., BAER, T.M.: Peak Power  
Fluctuations  
in Optical Pulse Compression. In: IEEE Journal of

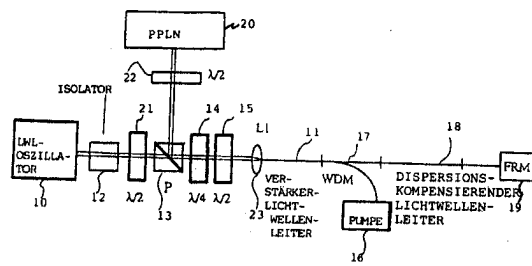
Quantum Electronics, Vol. 24, No. 2, 1988,  
S. 341-350;  
Hariharan et al.: "Alexandrite-pumped alexandrite  
regenerative amplifier for femtosecond pulse am-  
plification" in Optics Letters, 1996, Bd.21, S.128;  
Denk, W.: "Two-photon excitation in functional bio-  
logical imaging" in Journal of Biomedical Optics,  
1996, Bd.1, S.296;  
Van Exter et al.: "Terahertz time-domain spectrosc-  
copy of water vapor" in Optics Letters, 1989, Bd.  
21, S.1759;  
Islam et al.: "Broad-bandwidths from  
frequency-shi-  
fting solitons in fibers" in Optics Letters, 1989,  
Bd.14, S.370;  
Galvanauskas et al.: "Generation of femtosecond  
op-  
tical pulses with nanojoule energy from a diode  
laser and fiber based system" in Applied Physics  
Letters, 1993, Bd.63, S.1742;  
Ong et al.: "Subpicosecond soliton compression  
of  
gain-switched diode laser pulses using an erbium-  
doped fiber amplifier" in IEEE Journal of Quantum  
Electronics, 1993, Bd.29, S.1701;  
Tamura et al.: "Pulse compression using nonlinear  
pulse evolution with reduced optical wave break-  
ing in erbium-doped fiber amplifiers with normal  
group-velocity dispersion" in Optics Letters, 1996  
, Vol.21, Nr.1, S.68-70;  
Kurokawa et al.: "Wavelength-dependent  
amplifica-  
tion characteristics of femtosecond erbium-doped  
optical fiber amplifiers"; #####

(54) Bezeichnung: Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von Femtosekundenimpulsen mit hoher Leistung mittels eines Lichtwellenleiter-Verstärkers

(57) Hauptanspruch: Vorrichtung zur Erzeugung von optischen Hochleistungs-Impulsen, gekennzeichnet durch eine optische Quelle (10) zur Erzeugung von Signallicht, einen nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) mit einer nichtlinearen Phasenverzögerung, der das durch die

optische Quelle (10) erzeugte Signallicht empfängt, und einen Frequenzwandler (20), der aus dem nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) ausgegebene optische Impulse empfängt, wobei der Frequenzwandler (20) die optischen Hochleistungs-Impulse an dessen Ausgang er-

zeugt.





## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Erzeugung von Femtosekundenimpulsen mit hoher Leistung und insbesondere ein System, das einen Oszillator, einen Verstärker, einen Kompressor und einen Frequenzwandler zur Erzeugung von Femtosekundenimpulsen verwendet.

### Stand der Technik

**[0002]** Techniken zur Erzeugung von kurzen und ultrakurzen optischen Impulsen bei Lichtwellenleitern sind bereits seit einigen Jahren bekannt und sind vor kurzem auf vielen Gebieten angewandt worden. Beispielsweise sind wie in der Clark erteilten US-5 530 582 offenbart und wie durch A. Hariharan u.a. in „Alexandrite-pumped alexandrite regenerative amplifier for femtosecond pulse amplification“, „Optics Letters“, Bd. 21, S. 128 (1996) berichtet ultrakurze optische Impulse als Injektionsquellen verwendet worden. Die Injektionseinkopplung ("injection seeding") von Hochleistungsverstärkern zieht wie durch Clark und Hariharan beschrieben wesentlich aus Impulswellenlängen Nutzen, die in dem Bereich unter  $1,2\ \mu\text{m}$  liegen. Ähnliche Einschränkungen gelten für viele andere derzeit verfolgte Anwendungen von ultrakurzen Impulsen, beispielsweise bei der THz-Erzeugung (wie durch W. Denk in „Two-photon excitation in functional biological imaging“, „Journal of Biomedical Optics“, Bd. 1, S. 296 (1996) berichtet) oder in der konfokalen Mikroskopie (wie durch van Exter u.a. in „Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor“, „Optics Letters“, Bd. 14, S. 1128 (1989) berichtet). Derartige Wellenlängen können durch Frequenzverdopplung der Impulse aus einem ultraschnellen Erbium-Lichtwellenleiteroszillator (wie durch Clark und L.E. Nelson u.a. in „Efficient frequency-doubling of a femtosecond fiber laser“, „Optics Letters“, Bd. 21, S. 1759 (1996) vorgeschlagen) erzeugt werden, d.h. einen Oszillator, der Impulse in der Größenordnung von 100 fs erzeugt, oder wahlweise von Lichtwellenleiter-Verstärkersystemen (wie durch Hariharan vorgeschlagen). Jedoch lehrt keine dieser Veröffentlichungen, daß der Wirkungsgrad der Frequenzverdopplung durch eine Einschränkung der spektralen Akzeptanz- bzw. Toleranzbandbreite des Verdopplungskristalls optimiert werden kann.

**[0003]** Außerdem lehrt keine dieser Veröffentlichungen, daß eine hervorragende Leistungsfähigkeit auch durch Implementierung von Oszillator- bzw. Verstärkerentwürfen mit nichtlinearen Verstärkern oder durch Implementierung von Oszillator- bzw. Verstärkerentwürfen mit nichtlinearen Kompressoren erhalten werden kann.

**[0004]** Vor dem Impulsverstärker oder -kompressor verwendete Impulse müssen nicht von einem Lichtwellenleiteroszillator hergeleitet werden, wie in den vorstehend erwähnten Veröffentlichungen von Clark und Hariharan beschrieben wurde. Wahlweise können Impulse aus optischen Großeinrichtungen (siehe Islam u.a.: „Broad-bandwidths from frequency-shifting solitons in fibers“, „Optics Letters“, Bd. 14, S. 370 (1989)) oder Diodenlasern (siehe Galvanauskas u.a.: „Generation of femtosecond optical pulses with nanojoule energy from a diode laser and fiber based system“, „Applied Physics Letters“, Bd. 63, S. 1742 (1993) und Ong u.a.: „Subpicosecond soliton compression of gain-switched diode laser pulses using an erbiumdoped fiber amplifier“, „IEEE Journal of Quantum Electronics“, Bd. 29, S. 1701 (1993)) verwendet werden. Es sei bemerkt, daß die durch Clark und Hariharan offenbarten Systeme lineare Verstärker verwenden, und nicht vorgeschlagen wird, daß Impulse von einem nichtlinearen Verstärker hergeleitet werden. Außerdem verwenden die durch Islam, Galvanauskas und Ong offenbarten Systeme keine Frequenzverdopplung.

**[0005]** Darüber hinaus erfordert die Erzeugung der kürzestmöglichen Impulse mit Systemen nur mit Oszillatoren, wie die durch Clark, Nelson u.a. offenbarten, typischerweise komplizierte Hohlraum-Entwürfe mit relativ hohen optischen Verlusten, die deswegen nicht sehr effektiv bei der Erzeugung einer maximalen Ausgangsleistung für eine bestimmte Pumpleistung sind.

**[0006]** Die DE 195 10 432 A1 zeigt einen modenverkoppelten Faserlaser mit ultrakurzen Impulsen, die durch nicht-lineare Effekte erzeugt werden.

**[0007]** Hinsichtlich der Kompressionstechniken bei Systemen zur Erzeugung von ultrakurzen optischen Impulsen gibt es zwei Möglichkeiten: die Verwendung eines Lichtwellenleiters mit positiver Dispersion (der keine Solitonwelle gestattet), wie in der Kafka erteilten US-4 913 520 sowie durch Tamura u.a.: „Pulse compression using nonlinear pulse evolution with reduced optical wave breaking in erbium-doped fiber amplifiers with normal group-velocity dispersion“, „Optics Letters“, Vol. 21, Nr. 1, (1996), S. 68–70, offenbart; oder die Verwendung von Lichtwellenleitern mit negativer Dispersion (die eine Solitonwelle gestattet), wie durch Islam u.a. offenbart. Es wird auch auf „Peak Power Fluctuations in Optical Pulse Compression“ von Kafka u.a., „IEEE Journal of Quantum Electronics“, Bd. 24, S. 341 (1988) verwiesen. Obwohl Lichtwellenleiter mit positiver Dispersion

im Prinzip für die Erzeugung von Impulsen von weniger als 10 fs verwendet werden können, erfordern derartige Lichtwellenleiter zusätzliche lineare Impulskompressoren, die einen Entwurf mit niedrigen Kosten verhindern. Auf gleiche Weise kann bei Kompressionstechniken mit einem Lichtwellenleiter mit positiver Dispersion der Ramaneffekt im allgemeinen nicht verwendet werden, da die Wirkungen der Ramanumwandlung nachteilig eingeschätzt werden (siehe Kafka).

**[0008]** Deswegen werden Impulskompressoren auf Grundlage von Lichtwellenleitern mit negativer Dispersion trotz der Tatsache bevorzugt, daß die erzeugte Impulsbreite typischerweise länger als 10 fs ist, da derartige Lichtwellenleiterkompressoren derart entworfen werden können, daß sie nicht auf externen linearen Impulskompressoren beruhen. Darüber hinaus können derartige Kompressoren derart entwickelt werden, daß sie aus der Raman-Eigenfrequenzverschiebung bei Lichtwellenleitern einen Vorteil ziehen, die dazu neigt, das Spektrum des komprimierten Impulses weiter zu verbreitern (siehe Islam u.a.).

**[0009]** Dies kann jedoch zu der Erzeugung eines Austastimpulses mit niedrigem Pegel in dem erwünschten komprimierten Impuls führen, was bei vielen Anwendungen von ultraschneller Optik abträglich ist. Demgegenüber ist die Spektralentwicklung des Ramanimpulses nützlich, da sie ein bestimmtes Ausmaß an Abstimmbarkeit gestattet (siehe Islam u.a.). Derartige Impulskompressoren sind nachstehend als Soliton-Raman-Kompressoren (SRC) beschrieben.

**[0010]** Eine frühe Systemimplementierung eines Soliton-Raman-Kompressors bei einem Erbium-Lichtwellenleiter-Verstärker wurde durch K. Kurokawa u.a. in „Wavelength-dependent amplification characteristics of femtosecond erbium-doped optical fiber amplifiers“, „Applied Physics Letters“, Bd. 58, S. 2871 (1991) beschrieben. Jedoch erzeugte in dem darin offenbarten System ein Diodenlaser die „Einkopplungs“-Impulse für den Soliton-Raman-Verstärker.

**[0011]** Eine weitere Systemimplementierung eines Soliton-Raman-Kompressors bei einem Erbium-Lichtwellenleiter-Verstärker, die auf einem unpraktischen starken Lasersignal und Pumpquellen beruht, wurde durch I. Y. Krushev u.a. in „Amplification of Femtosecond Pulses in  $\text{Er}^{3+}$ -doped single-mode optical fibers“, „Electronics Letters“, Bd. 26, S. 456 (1990) berichtet.

**[0012]** Die erste Implementierung eines Soliton-Raman-Kompressors bei einem Erbiumverstärker unter Verwendung eines Lichtwellenleiter-Lasers als Einkopplung wurde durch Richardson u.a. in „Passive all-fiber source of 30 fs pulses“, „Electronics Letters“, Bd. 28, S. 778 (1992) und in „Amplification of femtosecond pulses in a passive all-fiber soliton source“, „Optics Letters“, Bd. 17, S. 1596 (1992) beschrieben. Jedoch implementieren die in den Veröffentlichungen durch Islam u.a., Galvanauskas u.a., Ong u.a., Kafka, Tamura u.a., Kurokawa u.a., Khrushchev u.a. und Richardson u.a. offenbarte Systeme keine Frequenzumwandlung unter Verwendung eines nichtlinearen Verstärkersystems zur Erzeugung einer frequenzverdoppelten Wellenlänge.

**[0013]** Außerdem sehen die in den Veröffentlichungen von Islam u.a., Galvanauskas u.a., Ong u.a., Tamura u.a., Kurokawa u.a., Khrushchev u.a. sowie Richardson u.a. keine Steuerung des Polarisationszustands des Soliton-Raman-Kompressors vor. Derzeit ziehen Soliton-Raman-Kompressoren einen Nutzen aus dem Ramaneffekt in Lichtwellenleitern, der wiederum von dem Polarisationszustand des Lichts in dem Lichtwellenleiter und der Lichtwellenleiter-Doppelbrechung abhängt, wie durch Menyak u.a. in „Raman effect in birefringent optical fibers“, „Optics Letters“, Bd. 16, S. 566 (1991) offenbart ist. Darüber hinaus kann eine nichtlineare Polarisationsentwicklung in hochgradig nichtlinearen Soliton-Raman-Kompressoren stattfinden, wie durch Fermann u.a. in „Optics Letters“, Bd. 19, S. 43 (1994) berichtet wurde. Daher kann ein reproduzierbarer und stabiler Soliton-Raman-Kompressor ohne Polarisationssteuerung nicht aufgebaut werden.

**[0014]** Die in dem vorangehenden Abschnitt aufgeführten Veröffentlichungen lehren auch nicht, wie der Wirkungsgrad von Soliton-Raman-Kompressoren allgemein zu maximieren ist und wie die Impulsenergie der mit den Soliton-Raman-Kompressoren erzeugten – komprimierten Impulse zu maximieren ist. Da die mit unkritisch phasenangepaßten Verdopplungskristallen erhaltbare Verdopplungseffektivität wie periodisch gepolte  $\text{LiNbO}_3$  (PPLN) hauptsächlich von der Impulsenergie abhängt und nicht kritisch von der Impulsbreite abhängt, bei Verwendung von konfokaler Fokussierung, ist die Maximierung der Impulsenergie eindeutig ein kritischer Punkt.

**[0015]** In der vorstehenden Veröffentlichung von Richardson u.a. wurde vorgeschlagen, daß eine unbestimmte Steuerung der Modengröße eines Lichtwellenleiter-Oszillators und eines Lichtwellenleiter-Verstärkers zu der Erzeugung der kürzestmöglichen Impulse führen kann. Jedoch kann eine Maximierung der Impulsenergie von einem derartigen System tatsächlich eine höhere Leistung bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge erzeugen.

[0016] Als Alternative zu Soliton-Raman-Kompressoren ist eine adiabatische Soliton-Verstärkung zur Impulskompression diskutiert worden (siehe E. M. Dianov u.a., „Optics Letters“, Bd. 14, S. 1008 (1989)). Im allgemeinen erfordert der adiabatische Zustand, daß der Verstärkungskoeffizient  $\alpha$  pro Solitonperiode wesentlich kleiner als 1 ist. In diesem Fall ist die Solitonperiode des Solitons mit  $L_s \approx 0,5 |\beta_2|/\tau^2$  definiert, wobei  $\tau$  die FWHM (volle Breite, halbes Maximum) Impulsbreite des Solitons und  $\beta_2$  die Gruppengeschwindigkeitsdispersion des Lichtwellenleiters ist. Alternativ muß bei einer adiabatischen Soliton-Verstärkung das Aufbrechen der grundlegenden Solitonwelle mit  $N = 1$  in eine Solitonwelle mit  $N = 2$  verhindert werden. Da die Energie einer Solitonwelle mit  $N = 2$  für dieselbe Impulsbreite viermal höher als das für eine Solitonwelle mit  $N = 1$  ist, sollte die Verstärkung  $g$  pro Solitonperiode kleiner als ungefähr 2 sein. Infolgedessen müssen typischerweise Verstärkerlängen von einigen 10m bis zu mehreren km Länge verwendet werden, was nicht praktisch ist. Auf gleiche Weise kann wegen nichtlinearer Effekte höherer Ordnung in dem Lichtwellenleiter die Impulsenergie nach derart langen Lichtwellenleiterlängen verglichen mit dem, was mit kurzen Verstärkern möglich ist, geringer sein.

[0017] Als weitere Alternative zu Soliton-Raman-Kompressoren können Femtosekunden-Impulse durch Chirpimpuls-Verstärkung (CPA) bei Lichtwellenleitern verstärkt werden, wie durch Minelly u.a. in „Optics Letters“, Bd. 20, S. 1797 (1995) und in der Galvanauskas u.a. erteilten US-5 499 134 offenbart ist. Jedoch wird typischerweise so keine Impulsverkürzung, sondern eher eine Impulsverbreiterung wegen der begrenzten Bandbreite des Verstärkungsmediums und der zur Impulskomprimierung und Impulsdehnung verwendeten Gitter erhalten. Daher sind derartige Systeme weniger nützlich, solange die Impulsenergie ungefähr wenige nJ erreicht.

[0018] In dem durch Minelly u.a. beschriebenen System wurde ein Doppelmantel-Lichtwellenleiter, d.h. ein Lichtwellenleiter mit einem Doppelstufen-Beugungsindexprofil als Lichtwellenleiter implementiert. Daher wurde ein Mantelpumpen (wie in der Kafka erteilten US-4 829 529 offenbart) zur Abgabe des Pumplichts in den Lichtwellenleiter-Verstärker implementiert. Wie in der Veröffentlichung durch Minelly u.a. gelehrt kann die Modengröße der einzelnen Grundmode in derartigen Lichtwellenleitern erhöht werden, während gleichzeitig eine hohe Konzentration des Dotierstoff-Lösungsmittels ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei Minelly u.a.) beibehalten wird, das den Index erhöht. Wiederum kann eine hohe Konzentration eines Dotierstoff-Lösungsmittels die Lösbarkeit eines Dotierstoffs ( $\text{Er}^{3+}$  bei Minelly u.a.) erhöhen, was zu einem hohen Quantenwirkungsgrad für einen derartigen Verstärker führen kann.

[0019] Jedoch lehren Minelly u.a. nicht, daß das Leistungsvermögen derartiger Lichtwellenleiter zur Femtosekundenimpuls-Verstärkung durch Richten des Pumplichts direkt in den Kern optimiert werden kann, anstelle ein Mantelpumpen zu implementieren.

[0020] Als Alternative zur Chirpimpuls-Verstärkung kann auch eine lineare Verstärkung kurzer optischer Impulse in Betracht gezogen werden. Ob ein Verstärker als linear oder nichtlinear betrachtet werden kann, hängt von der durch den Verstärker verursachten nichtlinearen Phasenverzögerung  $\Phi_{nl}$  ab. Nimmt man einen linearen Anstieg der Impulsenergie mit der Lichtwellenleiterlänge bei einem gesättigten Verstärker und eine Verstärkungsrate von wesentlich mehr als dem adiabatischen Zustand an, ist die nichtlineare Phasenverzögerung  $\Phi_{nl}$  eines Impulses bei einem Verstärker der Länge  $L$  ungefähr gegeben durch

$$\Phi_{nl} = \frac{2\pi n_2 EL}{A\lambda\tau^2} \quad (1),$$

wobei  $n_2$  der nichtlineare Brechungsindex,  $n_2 = 3,2 \times 10^{-20} \text{W}^{-1}$  für Siliziumglas,  $A$  die Kernfläche,  $\lambda$  die Signalwellenlänge und  $\tau$  die Impulsbreite ist. In diesem Fall wurde eine dispersionsfreie Verstärkung mit einer Stufe angenommen; für eine Verstärkung mit zwei Stufen wird  $L/2$  durch  $L$  ersetzt. Herkömmliche Laserverstärker sind typischerweise derart entwickelt, daß sie eine gute Impulsqualität bei einer Signalwellenlänge erzeugen, was eine Entwicklung für einen Verstärker mit  $\Phi_{nl} < 5$  impliziert.

[0021] Es sei bemerkt, daß das Problem der Polarisationssteuerung bei einem Nichtpolarisation erhaltenden Lichtwellenleiter durch Implementation von Faraday-Rotationsspiegeln (FRMs) minimiert werden kann. Vorangegangene Verwendungen von Faraday-Rotationsspiegeln waren tatsächlich jedoch auf lineare Lichtwellenleiterverstärker beschränkt, wie in der Duling u.a. erteilten US-5 303 314 offenbart, oder nur auf ultraschnelle Femtosekunden-Lichtwellenleiterlaser, wie in der vorstehend erwähnten Veröffentlichung durch Fermann u.a. offenbart.

[0022] Auf sämtliche der vorstehend erwähnten Artikel und Patentschriften sei hiermit zur Bezugnahme verwiesen.

## Aufgabenstellung

**[0023]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, kurze optische Impulse mit einer Signalwellenlänge (SW) in kurze optische Impulse mit einer frequenzverdoppelten Wellenlänge (FDW) umzuwandeln. Erfindungsgemäß weist ein System einen Kurzimpuls-Oszillator, einen Verstärker, einen Kompressor und einen Frequenzwandler auf, wobei der Verstärker und der Kompressor hochgradig nichtlinear sein und der Vorgang der Verstärkung und Kompression in einer optischen Einheit kombiniert werden können. Die Implementation eines Frequenzwandlungsvorgangs gestattet die Verwendung von sehr hochgradig nichtlinearen Verstärkern oder Kompressoren mit einer Signalwellenlänge (SW) ohne Eingehen von Kompromissen hinsichtlich der Impulsqualität bei einer frequenzverdoppelten Wellenlänge (FDW).

**[0024]** Die Entwicklung des Oszillators, des Verstärkers sowie des Kompressors kann hinsichtlich der Energie effektiver als Entwicklungen nur mit grundlegenden Oszillatoren sein, da die Erzeugung der kürzestmöglichen Impulse aus Oszillatoren typischerweise komplizierte Hohlraum-Entwürfe mit relativ hohen optischen Verlusten beinhaltet, die daher nicht sehr effektiv bei der Erzeugung einer maximal möglichen Ausgangsleistung für eine bestimmte Pumpleistung sind. Darüber hinaus gestattet die Implementation eines nichtlinearen Verstärker-/Impulskompressors die Verwendung von Oszillator-Einkopplungsimpulsen mit bedeutend längeren Impulsbreiten als bei Techniken nur mit Oszillatoren zum Erhalt einer schließlich bestimmten ultrakurzen Impulsbreite. Dies gestattet wiederum eine Vereinfachung des Oszillatorentwurfs und führt zu einer wesentlichen Kostensenkung für das System.

**[0025]** Eine besondere Systemimplementierung weist einen Kurzimpuls-Lichtwellenleiter-Laseroszillator, einen Lichtwellenleiter-Verstärker, einen Soliton-Raman-Kompressor (SRC) und einen nichtlinearen Kristall (NC) auf, wobei eine nichtlineare Frequenzumwandlung hauptsächlich bei dem nichtlinearen Kristall auftritt. Durch einen umsichtigen Entwurf des Soliton-Raman-Kompressors und eine geeignete Wahl des nichtlinearen Kristalls wird der Wirkungsgrad des Umwandlungsvorgangs maximiert, und die fast bandbreitenbegrenzten Impulse bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge werden selbst mit Impulsen niedriger Qualität bei der Signalwellenlänge erzeugt.

**[0026]** Der Soliton-Raman-Kompressor wird durch Steuerung dessen Polarisationszustand und dessen Dispersionseigenschaften durch Verwendung von Lichtwellenleitern mit großen Modenwerten und durch Steuerung des Werts der Raman-Verschiebung bei dem Verstärker optimiert.

**[0027]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung wird der Lichtwellenleiter-Verstärker mit dem Soliton-Raman-Kompressor kombiniert, wobei der Wirkungsgrad des Verstärkers durch Implementierung von Lichtwellenleitern mit Doppelstufenprofilen des Brechungsindex optimiert werden kann. Langzeitverschiebungen des Polarisationszustands werden durch Verwendung eines Faraday-Rotationsspiegels (FRM) in Verbindung mit einem Verstärker und einem Soliton-Raman-Kompressor vermieden. Alternativ kann die Verwendung eines polarisationserhaltenden, erbiumdotierten Lichtwellenleiters für den Verstärker und den Soliton-Raman-Kompressor verwendet werden.

**[0028]** Erfindungsgemäß wird demonstriert, daß eine Frequenzumwandlung hauptsächlich nicht nur für den komprimierten Teil der aus dem Soliton-Raman-Kompressor austretenden Impulse implementiert werden kann, wohingegen der unkomprimierte Impulsteil in dem nichtlinearen Frequenzumwandlungsvorgang unterdrückt werden kann. Außerdem kann durch Auswahl eines nichtlinearen Vorgangs mit einer Akzeptanzbandbreite, die kleiner als die Bandbreite der aus dem Soliton-Raman-Kompressor austretenden Impulse ist, der Wirkungsgrad der nichtlinearen Frequenzumwandlung optimiert werden.

**[0029]** Gemäß einer anderen Ausgestaltung der Erfindung gestattet die Raman-Verschiebung bei dem Soliton-Raman-Kompressor und der Implementierung eines nichtlinearen Frequenzumwandlungsvorgangs eine beschränkte Abstimmbarkeit der frequenzverdoppelten Wellenlänge.

**[0030]** Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird Pumplicht direkt in den Lichtwellenleiterkern eines Doppelmantel-Lichtwellenleiters gepumpt, damit ein Vorteil aus der Tatsache gezogen werden kann, daß die Pumpabsorption in dem Lichtwellenleiterkern höher als die Absorption in dem Mantel um einen Faktor ist, der proportional zu dem Verhältnis (Fläche des Innenmantels)/(Kernfläche) ist. Diese Anordnung gestattet die Verwendung von kürzeren Verstärker-Lichtwellenleitern als dies mit Mantelpumpen möglich ist, was wiederum die Nichtlinearität des Verstärkers zur Verstärkung von Femtosekundenimpulsen minimiert.

**[0031]** Schließlich kann bei Anpassung an konfokale Mikroskopieanwendungen das Leistungsvermögen ei-

ner erfindungsgemäßen Impulsquellen-/Lichtwellenleiter-Verstärker-/Frequenzwandleranordnung durch Auswahl von fast bandbreitenbegrenzten Impulsquellen optimiert werden, die relativ lange Impulse erzeugen, damit eine fast lineare Verstärkung bei dem Lichtwellenleiter-Verstärker gestattet wird.

#### Ausführungsbeispiel

[0032] Die Erfindung wird nachstehend anhand der bevorzugten Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher beschrieben. Es zeigen:

[0033] **Fig. 1** eine Doppelstufenkonfiguration der erfindungsgemäßen Vorrichtung,

[0034] **Fig. 2** das Beugungsindexprofil des Verstärkers gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel,

[0035] **Fig. 3** eine interferometrische Autokorrelation der frequenzverdoppelten, optischen Impulse gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

[0036] **Fig. 4** die Spektren der aus dem Soliton-Raman-Kompressor bei unterschiedlichen Temperaturen des PPLN austretenden Impulse gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

[0037] **Fig. 5** die abgesenkte Spektralbreite bei dem Oszillator und bei dem Verstärker wegen der Eigenphasenmodulation bei dem Verstärker, wenn die Pumpleistung verringert ist,

[0038] **Fig. 6** eine Einzelstufenkonfiguration der erfindungsgemäßen Vorrichtung,

[0039] **Fig. 7** ein erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel, bei dem Gegenrichtungspumpen verwendet wird,

[0040] **Fig. 8** ein erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel, bei dem ein Lichtwellenleiter-Verstärker zwei Dotierpegel und einen undotierten Lichtwellenleiterabschnitt aufweist,

[0041] **Fig. 9** ein erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel, bei dem ein Doppelmantel-Verstärker-Lichtwellenleiter verwendet wird,

[0042] **Fig. 10** ein erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel, bei dem ein Multimoden-Lichtwellenleiter-Verstärker verwendet wird,

[0043] **Fig. 11** ein Blockschaltbild der Erfindung,

[0044] **Fig. 12** ein Blockschaltbild der Erfindung, bei dem ein linearer Verstärker und ein nichtlinearer Kompressor verwendet werden, und

[0045] **Fig. 13** ein anderes Blockschaltbild der Erfindung.

[0046] Lediglich beispielhaft werden nachstehend drei bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben. Das Ziel des Systems gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel besteht darin, die durchschnittliche Leistung bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge (FDW) ohne Eingehen von Kompromissen hinsichtlich der Impulsbreite zu maximieren. Das Ziel des Systems gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel besteht darin, die durchschnittliche Leistung bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge insbesondere zur Optimierung des Wirkungsgrades zur Verwendung der frequenzverdoppelten Wellenlänge bei konfokaler Mikroskopie zu maximieren. Das Ziel des Systems gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel besteht darin, die erforderliche Pumpleistung für den Lichtwellenleiter-Verstärker des Systems zu minimieren.

[0047] **Fig. 1** stellt die Konfiguration eines Hochleistungs-Femtosekunden-Impulserzeugungssystems gemäß einem ersten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel dar. Gemäß **Fig. 1** erzeugt ein Lichtwellenleiteroszillator 10 Einkopplungsimpulse. Der Lichtwellenleiteroszillator 10 kann beispielsweise ein in der Umgebung stabiler Erbium-Lichtwellenleiter sein, der bei einer Wellenlänge von 1,5  $\mu\text{m}$  arbeitet. Ein derartiger Lichtwellenleiteroszillator wurde in der vorstehend erwähnten Veröffentlichung von Fermann u.a. offenbart. Der Lichtwellenleiteroszillator 10 kann bandbreitenbegrenzte Impulse von 300 fs mit einer Wiederholungsrate von 50 MHz mit einer einstellbaren durchschnittlichen Ausgangsleistung von 1 bis 5 mW erzeugen. Vorzugsweise sind die Impulse linear polarisiert.

[0048] Es sei bemerkt, daß die Einkopplungsimpulse nicht von einem Lichtwellenleiteroszillator erzeugt werden müssen; alternativ können Impulse aus optischen Großeinrichtungen oder Diodenlasern verwendet werden. Aus der Perspektive der Kosten sind Impulse entweder aus einem Diodenlaser oder aus einem Lichtwellenleiterlaser-Oszillator vorzuziehen. Im allgemeinen wird erwartet, daß ein Lichtwellenleiteroszillator saubere und kürzere Impulse erzeugt, was dafür vorteilhaft ist, damit eine effektivere nichtlineare Impulskompression stattfindet. Da die Anwendung von ultraschnellen Impulsen soviel Impulsleistung wie möglich hinsichtlich eines optischen Entwurfs erfordert, der leicht herzustellen ist, kann die Verwendung von Verstärkern auch sehr effektiv sein, die den Vorgang der Impulsverstärkung und der Impulskomprimierung kombinieren.

[0049] Bei dem System gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel werden Impulse mit einer durchschnittlichen Leistung von 2 mW in einen Soliton-Raman-Kompressor (SRC)-Erbium-Lichtwellenleiter-Verstärker **11** über einen Isolator **12** für das Signallicht bei 1,5 µm, einen darauffolgenden Polarisations-Strahlenteiler **13** sowie zwei Wellenplatten **14** und **15** eingekoppelt, die hinter dem Polarisations-Strahlenteiler **13** zur Einstellung des Polarisationszustands des in den Verstärker-Lichtwellenleiter **11** eingegebenen Signallichts eingesetzt werden. Die (links des Polarisations-Strahlenteilers **13** in Fig. 1 gezeigte) Wellenplatte **21** optimiert den Durchsatz zu dem Polarisations-Strahlenteiler **13**, die Wellenplatte **22** optimiert den Polarisationszustand in den (nachstehend beschriebenen) PPLN **20**, und ein Linsensystem **23** koppelt das Signallicht in den Verstärker-Lichtwellenleiter **11**. Der gesamte Einkopplungs-Wirkungsgrad von dem Oszillator **10** zu dem Verstärker-Lichtwellenleiter **11** wird durch den geeigneten Einsatz von modenangepaßten Linsen gesteuert, und ein Wirkungsgrad von 70 % oder mehr (bis zu 100 %) kann erreicht werden.

[0050] Gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel behält der Verstärker-Lichtwellenleiter **11** die Nichtpolarisation bei und weist einen Er<sup>3+</sup>-Dotierpegel von 0,1 Molekülprozent und ein Doppelstufenprofil des Brechungsindex auf. Das Brechungsindexprofil des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** ist in Fig. 2 abgebildet. Der innere Kern weist eine numerische Apertur (NA) 0,12 und einen Durchmesser von ungefähr 8 µm auf. Der äußere Kern weist einen Durchmesser von ungefähr 25 µm und eine numerische Apertur von 0,18 auf. Es sei bemerkt, daß das Pumplicht direkt in den inneren Kern des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** gerichtet werden kann. Der Verstärker-Lichtwellenleiter **11** wird durch eine Pumpe **16** bei 1,48 µm über einen Wellenlängenmultiplex- (WDM-) Koppler **17** gepumpt, wobei das Pumplicht über einen Breitbandisolator geleitet wird, damit ein Verlust des Hochleistungs-Signallichts bei 1,5 µm verhindert wird. Nach dem WDM-Koppler **17** wird eine Pumpleistung von 100 mW in den Verstärker-Lichtwellenleiter **11** gekoppelt. Gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel beträgt die Länge des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** ungefähr 2,5 m; die gesamte Länge des zur Signallichtausbreitung verwendeten WDM-Lichtwellenleiters ist auf 0,50 m begrenzt. Obwohl Fig. 1 einen dispersionskompensierenden Lichtwellenleiter **18** darstellt, der nachstehend näher beschrieben wird, muß das System gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel keinen dispersionskompensierenden Lichtwellenleiter verwenden.

[0051] Gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel handelt es sich bei dem Verstärker-Lichtwellenleiter **11** um einen Er<sup>3+</sup>-dotierten Lichtwellenleiter. Der Verstärker-Lichtwellenleiter **11** kann jedoch irgendein mit ErYb<sup>3+</sup>, Pr, Tm, Ho dotierter Lichtwellenleiter oder ein mit seltenen Erden dotierter Lichtwellenleiter sein, der mit einem geeigneten Oszillator kombiniert ist. Außerdem dient der Verstärker-Lichtwellenleiter **11** gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel auch als der Soliton-Raman-Kompressor; jedoch können der Verstärker und der Soliton-Raman-Kompressor getrennte Komponenten sein.

[0052] Gemäß Fig. 1 kann ein Doppelstufenaufbau zur Signallichtverstärkung verwendet werden. Bei dem Doppelstufenaufbau ist es vorteilhaft, einen Faraday-Rotationsspiegel (FRM) **19** an einem Ende des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** zu implementieren. Der Polarisationszustand des Lichts an dem Ausgang des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** ist dann senkrecht zu dem Polarisationszustand bei dem Eingang, weshalb der vorstehend erwähnte Polarisations-Strahlenteiler **13** für nahezu 100 % Wirkungsgrad der Ausgangskopplung des verstärkten Lichts aus dem System verwendet werden kann. Obwohl ein Faraday-Rotationsspiegel in Fig. 1 abgebildet ist, kann jede Lichtwellenleiter-Polarisations-Steuereinrichtung oder eine λ/4-Wellenplatte verwendet werden.

[0053] Es sei bemerkt, daß selbst bei dem Vorhandensein der erwünschten nichtlinearen Frequenzverschiebung bei dem Verstärker-Lichtwellenleiter **11** die Einstellungen der beiden Wellenplatten **14** und **15** bei dem Eingang des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** eine sehr effektive Ausgangskopplung des verstärkten Lichts gestatten. Außerdem gestattet eine Einstellung der Wellenplatten **14** und **15** eine Optimierung des Soliton-Raman-Kompressors durch Steuerung des Polarisationszustands in dem Lichtwellenleiter und durch Steuerung einer nichtlinearen Polarisationsentwicklung in dem Verstärker-Lichtwellenleiter **11**.

[0054] In mit dem System gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel durchgeführten Untersuchungen wurde

hinter der doppelten Stufe des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** eine durchschnittliche Ausgangsleistung von 30 mW (Impulsenergie von 600 pJ) gemessen. Bei Ersetzen der Einkopplungs-Signalimpulse mit einem CW – (Continuous Wave-) Signal mit demselben durchschnittlichen Signalpegel wurde eine durchschnittliche Leistung von bis zu 37 mW aus dem Verstärker-Lichtwellenleiter **11** entnommen. Der Energieverlust von 20 % bei gepulster Verstärkung entsteht aus der Raman-Verschiebung der verstärkten Impulse bei der Signalwellenlänge (SW). Gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel beträgt die Raman-Verschiebung 20 nm, was die Signalimpulse außerhalb der Verstärkungsbandbreite von Erbium verschiebt. Darüber hinaus können optische Verluste wegen der begrenzten Bandbreite der optische Elemente (WDM-Koppler usw.) verursacht werden, was durch die verstärkten Impulse begegnet wird.

**[0055]** Gemäß **Fig. 1** werden die verstärkten und komprimierten Impulse auf einer Länge von 0,8 mm von periodisch gepolten LiNbO<sub>3</sub> (PPLN) **20** frequenzverdoppelt, wobei eine konfokale Fokussierung verwendet wird. Gemäß diesem Beispiel ist der PPLN **20** nicht mit AR beschichtet. Die Polungsperiode des PPLN wird auf 19,25 µm eingestellt, was mit dem Maximum des Spektrums des komprimierten Impulses aus dem Soliton-Raman-Kompressor ungefähr übereinstimmend gewählt wird. Die Erwärmung des PPLN **20** auf Temperaturen zwischen 50°C bis 150°C kann zur Feinabstimmung der optimalen Frequenzverdopplungswellenlängen sowie zur Verhinderung eines photorefraktiven Schadens bei dem PPLN **20** verwendet werden. Die Länge des PPLN wird zur Erzeugung einer Frequenzverdopplungsbandbreite einer Größe gewählt, die vergleichbar mit oder kleiner als die Bandbreite der komprimierten Impulse aus dem Soliton-Raman-Kompressor ist. Es sei jedoch bemerkt, daß die spektrale Akzeptanzbandbreite des PPLN bei der Signalwellenlänge viel kleiner als der Wert des Spektrums bei der Signalwellenlänge ohne eine Strafe hinsichtlich des gesamten Verdopplungswirkungsgrades sein kann. Der PPLN wandelt die Frequenz selbst eines Signalwellenlängen-Spektrums außerhalb dessen Nenn-Akzeptanzbandbreite effektiv um. Dies ist auf einen nichtlinearen Vorgang zurückzuführen, der ähnlich zu einer Summenfrequenzerzeugung ist, die wie nachstehend beschrieben bei dem PPLN auftritt. Dies steht im Widerspruch zu einem Frequenzwandlerentwurf, wie er in der vorstehend erwähnten Veröffentlichung von Nelson u.a. beschrieben ist, der keine Punkte erwähnt, die auf die endliche Akzeptanzbandbreite eines Frequenzwandlerkristalls bezogen sind.

**[0056]** Die frequenzverdoppelten Impulse weisen eine Wellenlänge von 790 nm, eine durchschnittliche Leistung von 6,3 mW, eine Impulsbreite von 120 fs und ein Zeit-Bandbreite-Produkt von 0,66 auf, wenn man eine Gaußförmige Impulsform annimmt. Daher liegen die sich ergebenden Impulse innerhalb eines Faktors von 50 % der Bandbreitengrenze. Eine interferometrische Autokorrelation der Impulse ist in **Fig. 3** abgebildet, die die gute Qualität der Impulse veranschaulicht. Es sei bemerkt, daß durch Veränderung des Polarisationszustands vor dem Verstärker-Lichtwellenleiter **11** des Soliton-Raman-Kompressors eine Veränderung der gemessenen, frequenzverdoppelten Leistung zwischen 0,1 und 6,3 mW beobachtet wird, was das Erfordernis der Polarisationssteuerung bei diesem hochgradig nichtlinearen Verstärker veranschaulicht.

**[0057]** Der sich ergebende Umwandlungs-Wirkungsgrad von Pumplicht zu Femtosekundenimpulsen bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge beträgt daher 6,3 %. Demgegenüber beträgt der Umwandlungs-Wirkungsgrad von Signallicht zu frequenzverdoppeltem Licht 21 %. Daher weist der Soliton-Raman-Kompressor einen Kompressions-Wirkungsgrad von ungefähr 60 % auf, was sehr vorteilhaft mit Ergebnissen verglichen werden kann, die mit Lichtwellenleiter-Kompressoren mit positiver Dispersion erreichbar sind, wie diejenigen, die in der vorstehend erwähnten US-4 913 520 offenbart sind.

**[0058]** Diese Untersuchungsergebnisse wurden durch Implementierung eines Verstärkers mit einem großen Kerndurchmesser zur Maximierung der Energie der aus dem Soliton-Raman-Kompressor austretenden, komprimierten Impulse erhalten. Für einen Impuls mit einer festgelegten Breite  $\tau$  steigt die Solitonenergie  $W$  proportional zu der Lichtwellenleiter-Kernfläche  $A$  und der Lichtwellenleiterdispersion  $\beta_2$ . Da der Soliton-Raman-Kompressor einen solitonähnlichen Impuls erzeugt, gestattet eine Maximierung der Kernfläche eine Maximierung der erzeugten Soliton-Impulsenergie aus dem Soliton-Raman-Kompressor. Außerdem minimiert ein großer Kerndurchmesser auch die Lichtwellenleiter-Wellenleiter-Dispersion, was wiederum die totale Lichtwellenleiterdispersion  $\beta_2$  maximiert. Obwohl das letztere lediglich ein Sekundäreffekt ist, erhöht es weiter die Impulsenergie.

**[0059]** Es sei bemerkt, daß das Signal hinter der Doppelstufe des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** tatsächlich kleiner als nach einer einzelnen Stufe ist. Abgesehen von durch den großen Wert der Raman-Verschiebung verursachten Energieverluste, die in dem Verstärker-Lichtwellenleiter **11** auftreten, hat der Verstärker-Lichtwellenleiter **11** auch eine Überlänge, d.h., das meiste des Pumplichts wird zu der Zeit absorbiert, zu der es das Einkopplungsende des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** erreicht. Daher ist der Verstärker an diesem Ende nicht vollständig invertiert, und es tritt ein Signalverlust bei der Signalwellenlänge auf.



**[0060]** Nachstehend wird das zweite Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben. Die Entwicklungskriterien für das System gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel werden hauptsächlich zum Erfüllen der Erfordernisse eines konfokalen Zweiphoton-Abbildungssystems ausgewählt. Es sei angenommen, daß die frequenzverdoppelte Wellenlänge (ungefähr 800 nm gemäß diesen Beispielen) als Quelle für die Zweiphoton-Erregung verwendet wird. Es kann gezeigt werden, daß die Anzahl von durch die Zweiphoton-Erregung für einen festgelegten Strahldurchmesser erzeugten Photonen  $M$  proportional ist zu:

$$M = \text{const} \frac{\bar{P}^2}{f\tau}, \quad (2)$$

wobei  $\text{const}$  eine Konstante,  $P$ ,  $f$ ,  $\tau$  die durchschnittliche Leistung, die Wiederholungsrate und die FWHM-Impulsbreite der Erregerquelle sind. Gemäß Gleichung 2 ist es eindeutig wichtiger, die durchschnittliche Leistung zu erhöhen, als die Impulsbreite für eine effektive, konfokale Zweiphoton-Abbildung zu verringern. Es sei jedoch bemerkt, daß bei tatsächlichen biologischen Systemen sowohl Schadens-Schwellwerte als auch Photobleichbetrachtungen der auf Impulsleistung, -energie und -breite bezogenen biologischen Proben bestehen können, die durch Gleichung (2) nicht berücksichtigt sind. Bei der Beschreibung des zweiten Ausführungsbeispiels wird die Maximierung der durchschnittlichen Leistung bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge jedoch ohne Berücksichtigung des Schadens oder von Photobleichpunkten beschrieben.

**[0061]** Die in **Fig. 1** dargestellte Anordnung kann auch auf das zweite Ausführungsbeispiel angewandt werden. Das zweite Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von dem ersten Ausführungsbeispiel darin, daß eine Oszillatorleistung von 4 mW verwendet wird. Der Verstärker-Lichtwellenleiter **11** ist ähnlich wie der gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel; jedoch ist die numerische Apertur des inneren Kerns auf ungefähr  $NA = 0,10$  abgesenkt und die Größe des inneren Kerns auf ungefähr 10  $\mu\text{m}$  erhöht. Außerdem ist der Er-Dotierpegel um ungefähr 25 % auf ungefähr 750 ppm verringert. Die Länge des Verstärker-Lichtwellenleiters **11** beträgt 2,6 m und wird derart ausgewählt, daß sie die höchste Durchschnittsleistung für einen linearen Betrieb des Verstärkers erzeugt (d.h. durch Verwendung eines CW-Signals von 4 mW als Einkopplung). Die Länge des PPLN **20** wird auf 1,2 mm erhöht, damit die Länge der Impulse bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge erhöht wird; die Periode des PPLN **20** wird auf 18,75  $\mu\text{m}$  verringert, damit eine effektive Frequenzverdopplung bei 1,56  $\mu\text{m}$  gestattet wird. In mit dem System gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel durchgeführten Untersuchungen erzeugte eine Doppelstufe der Einkopplungsimpulse über den Verstärker-Lichtwellenleiter **11** 54 mW bei der Signalwellenlänge, wohingegen eine Doppelstufe eines CW-Signals eine Leistung von 57 mW bei der Signalwellenlänge erzeugte, d.h. ein Signalverlust von lediglich 5 % wurde durch den nichtlinearen Betrieb des Verstärkers verursacht. Es wurde herausgefunden, daß das Spektrum der aus den Soliton-Raman-Kompressor austretenden Impulse in der Mitte bei 1,56  $\mu\text{m}$  (wie in **Fig. 4** dargestellt) lag. Es wurde herausgefunden, daß die Impulse bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge eine Wellenlänge von ungefähr 780 nm, eine durchschnittliche Leistung von 12 mW, eine Impulsbreite von 190 fs mit einer Spektralbreite innerhalb von 50 % der Bandbreitengrenze aufweisen. Eine Veränderung der Polarisation vor dem Soliton-Raman-Kompressor-Verstärker-Lichtwellenleiter **11** erzeugte eine Veränderung der Leistung bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge zwischen 7 bis 12 mW. Der sich ergebende Umwandlungs-Wirkungsgrad bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge beträgt 22 %, was Reflexionsverluste berücksichtigt, und der Umwandlungs-Wirkungsgrad steigt auf 29 %. Verglichen mit dem System gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel wird die Anzahl von Photonen  $M$  um einen Faktor von 2,2 erhöht.

**[0062]** Die hohe Leistung bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel ist ein Ergebnis der Optimierung des linearen Verstärker-Wirkungsgrads und der Beschränkung der Raman-Verschiebung der Impulse auf Wellenlängen in der Nähe der Wellenlänge der Oszillatorimpulse (innerhalb ungefähr 10 nm gemäß diesem Beispiel). Dies steht im Gegensatz zu dem durch Richardson u.a. in „Amplification of femtosecond pulses in a passive all-fiber soliton source“ (vorstehend diskutierten) berichteten System, in dem eine Raman-Verschiebung von 30 nm verwendet wurde. Die Impulsbreite des Raman-Solitons gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel ist eindeutig länger als diejenige gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel. Tatsächlich kann wegen der verringerten Nichtlinearität des Verstärkers das Raman-Soliton nicht vollständig entwickelt werden, und eine Impulskompression kann wegen eines großen Umfangs einer Soliton-Kompression von höherer Ordnung entstehen. Wegen der relativen Unempfindlichkeit von  $M$  auf die Impulsbreite erzeugt jedoch das System gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel ein höheres  $M$  als für das erste Ausführungsbeispiel.

**[0063]** Der gemäß den ersten und zweiten Ausführungsbeispielen erhaltene hohe Frequenzumwandlungs-Wirkungsgrad ist auch auf die Ausbeutung eines allgemeineren Frequenzumwandlungsvorgangs als nur Frequenzverdopplung zurückzuführen. Zur Verifikation des Vorhandenseins eines derartigen nichtlinearen Frequenzumwandlungsvorgangs wurde die Temperatur des PPLN **20** verändert, während die Spektra bei der

Signalwellenlänge und bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge gemessen wurden. Die Ergebnisse sind in **Fig. 4** abgebildet. Es sei bemerkt, daß wegen des Vorhandenseins einer Soliton-Kompression mit höherer Ordnung das Spektrum bei der Signalwellenlänge in zwei Teile mit einer Verarmung in der Mitte des Spektrums aufgeteilt wird, was dem Ort des Spektrums des injizierten Oszillatorimpulses entspricht. Bei  $T = 162^\circ\text{C}$  wird eine Frequenzumwandlung hauptsächlich bei der ramanverschobenen Wellenlänge erhalten; bei  $T = 100^\circ\text{C}$  wird eine Frequenzumwandlung bei dem Verarmungspunkt erhalten, wohingegen bei  $T = 25^\circ\text{C}$  eine Frequenzumwandlung hauptsächlich an dem blauen Ende des Signalwellenlängen-Spektrums erhalten wird. Es wurde beobachtet, daß der Umwandlungs-Wirkungsgrad bei einer frequenzverdoppelten Wellenlänge an dem Verarmungspunkt am höchsten ist, was eindeutig nicht allein mit einer einfachen Erzeugung einer zweiten Harmonischen erklärt werden kann. Eher erzeugt ein Vorgang wie eine Summenfrequenzerzeugung die frequenzverdoppelte Wellenlänge. Jedoch ist derzeit der genaue physikalische Ursprung dieses Phänomens nicht bekannt. Einige mögliche Erklärungen sind: die Resonanznatur des Frequenzverdopplungsvorgangs bei der PPLN, Effekte wegen des Impulschirps, Effekte wegen der kaskadierten Nichtlinearitäten zweiter Ordnung in dem Kristall oder gerade Effekte wegen des Imaginärteils der Nichtlinearität zweiter oder dritter Ordnung des PPLN **20** oder eine Wechselwirkung zwischen Nichtlinearitäten höherer Ordnung in dem PPLN **20**. Nachstehend wird auf diesen nichtlinearen Vorgang einfach als summenfrequenzerzeugungsähnliche Frequenzumwandlung (SLF) bezug genommen.

**[0064]** Gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel wurde experimentell beobachtet, daß die summenfrequenzerzeugungsähnliche Frequenzumwandlung die Verwendung eines nichtlinearen Kristalls (NC) mit einer Verdopplungsbandbreite gestattet, die wesentlich kleiner als die Bandbreite des Soliton-Raman-Kompressors ohne einen Kompromiß hinsichtlich des Umwandlungs-Wirkungsgrades bei einer Frequenzverdopplungswellenlänge ist. Dies ist nützlich, da es die Steuerung der Impulsbreite der Impulse der Frequenzverdopplungswellenlänge ohne einen Kompromiß hinsichtlich der Leistung bei der Frequenzverdopplungswellenlänge gestattet. Mit anderen Worten kann der nichtlineare Kristall die Leistung bei der Signalwellenlänge effektiv in eine Frequenzverdopplungswellenlänge durch Entnahme von Energie aus dem größten Teil des Spektrums bei den Impulsen bei der Signalwellenlänge (d.h. aus einem Spektrum, das größer als die spektrale Akzeptanzbandbreite des nichtlinearen Kristalls ist); daher können Impulse bei der Signalwellenlänge von relativ schlechter Qualität zur effektiven Frequenzumwandlung verwendet werden. Dies ist ein wertvolles Merkmal für die Entwicklung jeder Verstärker-/Frequenzwandleranordnung, da dieses Merkmal eine effektive Frequenzumwandlung nicht nur bei einer einzelnen Signalwellenlänge, sondern in einem innerhalb des gesamten Spektralbereichs der Signalwellenlänge gemäß **Fig. 4** abstimmbaren Wellenlängenbereich ermöglicht.

**[0065]** Es ist aufschlußreich, die Nichtlinearität des vorstehend beschriebenen Verstärkers unter Verwendung von Gleichung (1) zu berechnen. Für eine eingegebene Impulsbreite  $\tau$  von 300 fs und eine Impulsenergie von  $E = 1,2$  nJ wird  $\Phi_{n1} = 16,6$  erhalten. Daher können selbst hochgradig nichtlineare Verstärker (Kompressoren) Impulse mit sehr hoher Qualität erzeugen, sobald eine frequenzverdoppelte Wellenlänge verwendet wird. Dieses Prinzip wurde durch die vorstehend erwähnten Veröffentlichungen von Clark und Nelson u.a. nicht vorgeschlagen.

**[0066]** Außerdem ist es aufschlußreich, das Leistungsvermögen mit einem linearen Verstärker zu vergleichen. Verglichen mit einem linearen Verstärker wird die Pumpleistung zum Erhalt einer verstärkten Impulsenergie von 400 pJ verringert, was zu  $\Phi_{n1} \approx 5$  führt. Wegen der Eigenphasenmodulation bei dem Verstärker nimmt die Spektralbreite von ungefähr 8,2 nm (Spitze) bei dem Oszillator auf 5,7 nm bei dem Verstärker (unten) ab, wie in

**[0067]** **Fig. 5** dargestellt ist. Gemäß **Fig. 5** wird wie erwartet eine höhere Spektralqualität von verstärkten Impulsen bei „linearen“ Verstärkern erhalten.

**[0068]** Nachstehend wird das System gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel beschrieben. Die in **Fig. 1** dargestellte Anordnung wird auch auf das dritte Ausführungsbeispiel angewandt. Gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel wird ein in der Umgebung beständiger Oszillator verwendet, der Impulse von 50 pJ mit einer Wiederholungsrate von 5 MHz erzeugt. Die Impulse haben eine Bandbreite von 20 nm und sind positiv gechipped, d.h. der Chirp kann mit einer Länge von ungefähr 8 Metern eines Solitonwelle erlaubenden Lichtwellenleiters (Corning SMF28) kompensiert werden. Nach der Implementierung einer Chirp-Kompensation wurde beobachtet, daß die gemessene Impulsbreite bei der Signalwellenlänge 190 fs beträgt (wenn man eine Gaußsche Form annimmt), d.h. fast bandbreitenbegrenzte Impulse können auf diese Weise nach einer Chirp-Kompensation erhalten werden.

**[0069]** Die Entwicklung des Verstärkersystems gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel ist ähnlich zu denen

gemäß den ersten und zweiten Ausführungsbeispielen beschriebenen abgesehen von den folgenden Ausnahmen. Der Verstärker-Lichtwellenleiter **11** weist eine numerische Apertur von ungefähr 0,16 und einen Kerndurchmesser von ungefähr 6  $\mu\text{m}$  auf. Die Verstärkerlänge beträgt 1,1 m. In den Verstärker wird 90 mW Pumplicht bei 980 nm gepumpt. Ein dispersionskompensierender Lichtwellenleiter **19**, der ein Teil von mehreren Metern eines genormten Fernmelde-Lichtwellenleiters (Corning SMF28) ist, wird zwischen dem Wellenmultiplex-Koppler **17** und dem Faraday-Rotationsspiegel **19** zur Dispersionskompensation eingefügt. Die gesamte Länge des Lichtwellenleiters zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Verstärkersystems, über das das übertragene Signallicht eingestellt wird, wird zum Erhalt einer optimalen Dispersionskompensation der Oszillatorimpulse eingestellt. Diese Optimierung kann durch Messen der Impulsbreite der aus dem Verstärker austretenden Impulse mit einem Autokorrelator und Einstellung der Länge des eingefügten, genormten Fernmelde-Lichtwellenleiters verifiziert werden, bis eine aus dem System austretende, minimale Impulslänge erhalten wird. Während der Dispersions-Einstellphase wird die Pumpleistung bei dem Verstärker auf einen Pegel verringert, bei dem jegliche nichtlinearen Vorgänge in dem Verstärker minimiert werden, so daß keine Raman-Verschiebung des Signals beobachtet wird.

**[0070]** Gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel ist die Entwicklung des Frequenzverdopplersystems identisch mit den vorangegangenen Ausführungsbeispielen, aber das PPLN **20** mit einer Länge von nur 600  $\mu\text{m}$  wird verwendet. Das System gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel hat den Vorteil, daß die Dispersion des Verstärkersystems auf Null eingestellt und leicht gesteuert werden kann, was nützlich beim Erhalt der kürzestmöglichen Impulse aus dem Soliton-Raman-Kompressor ist. Da die Impulse über die gesamte Länge des Verstärkers stark gechirped sind, treten jegliche Nichtlinearitäten nur in dem letzten Teil des Verstärkers auf, was beim Erhalt der höchstmöglichen Ausgangsimpulsenergie aus dem Soliton-Raman-Kompressor vorteilhaft ist.

**[0071]** Bei dem System gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel werden die Signalimpulse auf eine Leistung von 4 mW verstärkt (eine Impulsenergie von 800 pJ/Impuls). Nach der Frequenzverdopplung werden Impulse von 100 fs mit einer durchschnittlichen Leistung von 1 mW experimentell bei 790 nm erhalten. Es wurde ermittelt, daß das Zeit-Bandbreite-Produkt ungefähr 0,50 beträgt, wenn man Gaußsche Impulse annimmt; daher betrugen die Impulse innerhalb von 10 bis 20 % der Bandbreitengrenze. Dies demonstrierte die vorteilhafte Wirkung der bei diesem System implementierten Dispersionseinstellung. Es wurde herausgefunden, daß der Wirkungsgrad der Frequenzverdopplung 25 % beträgt und niedriger als der ist, der für einen bandbreitenbeschränkten Signalimpuls von 800 pJ erwartet wird.

**[0072]** Bei sämtlichen der vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele werden relativ hohe Erbium-Dotierpegel zwischen 700 bis 1500 ppm trotz der Abnahme des Quanten-Wirkungsgrades dieser Arten von Verstärkern verglichen mit niedrigeren Dotierpegeln implementiert. Diese hohen Dotierpegel gestatten eine Minimierung der verwendeten Verstärkerlängen. Da Impulse von 1 nJ mit einer Breite von 100 fs eine Spitzenleistung von 10 kW haben, weisen sie wesentliche Nichtlinearitäten bei nur 20 bis 30 cm Lichtwellenleiter selbst für Verstärker mit großem Kern auf. Außerdem werden Impulse von 100 fs durch Dispersion dritter Ordnung in dem Lichtwellenleiter **11** beeinträchtigt. Deswegen ist es vorteilhaft, die Länge des Verstärkersystems zur Maximierung der Impulsqualität und zur Minimierung der erhaltbaren Impulsbreite zu minimieren. Allgemein sollte die Länge des Verstärkersystems jedoch nicht zu kurz sein, da zumindest der Einsatz der Soliton-Kompression höherer Ordnung sichergestellt werden muß, damit eine wesentliche Impulsverkürzung ermöglicht wird. Falls die Nichtlinearität des Verstärkers tatsächlich zu klein ist, führt eine Eigenphasenmodulation bei Lichtwellenleitern mit negativer Dispersion gemäß **Fig. 5** zu einer Impulsverbreiterung.

**[0073]** Zusätzlich zu den vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen sind einige andere Ausführungsbeispiele der Erfindung möglich. Insbesondere kann eine Dispersionsoptimierung oder ein Nulldispersionssystem bei den Systemen gemäß dem ersten oder zweiten Ausführungsbeispiel oder irgendein Verstärkersystem verwendet werden. Eine Kombination eines positiven oder negativen Dispersions-Lichtwellenleiters kann zum Erreichen einer Dispersionsoptimierung verwendet werden. Gemäß den ersten und zweiten Ausführungsbeispielen kann ein positivdispersions-kompensierender Lichtwellenleiter **18** mit einer geeigneten Länge zwischen dem Wellenlängenmultiplex-Koppler **17** und dem Faraday-Rotationsspiegel **19** gemäß **Fig. 1** eingesetzt werden.

**[0074]** Außerdem kann ein Einzelstufenaufbau in dem Soliton-Raman-Kompressor implementiert werden. Eine Systemimplementierung ist in **Fig. 6** abgebildet. Zur Ermöglichung einer vollständigen Polarisationsstabilität kann ein polarisationserhaltender Verstärker (PMA) verwendet werden. Die Polarisation des Lichts aus dem Oszillator **10** wird dann mit einer der Polarisationsachsen des polarisationserhaltenden Verstärkers ausgerichtet. Der Polarisationszustand an dem Ausgang wird derart eingestellt, daß er den höchsten Verdopplungsumwandlungs-Wirkungsgrad erzielt. Ein polarisationserhaltender Lichtwellenleiter ist jedoch kein Erfor-

demis bei einem Einzelstufenaufbau, da eine Kombination von Wellenplatten an dem Eingang **14**, **15** und an dem Ausgang **60** des Soliton-Raman-Kompressors zur Maximierung des Wirkungsgrades des Frequenzverdopplungsvorgangs wie in **Fig. 6** dargestellt verwendet werden kann. Jedoch wird eine bessere langfristige und Umgebungs-Stabilität mit einem polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter erwartet. Außerdem kann auch ein unterschiedlicher Wellenlängenmultiplex-Koppler **61** (und **62**) implementiert werden. Bei den in **Fig. 6** dargestellten Wellenlängenmultiplex-Kopplern **61** und **62** wird das Pumplicht in den Verstärker **11** über eine mikrooptische Anordnung gekoppelt, die dichroitische Spiegel beinhaltet. Derartige Wellenlängenmultiplex-Koppler können tatsächlich Freiraum-Ausgänge aufweisen, was bei der Minimierung jeglicher Kopplerleitungen und optischer Verluste in Verstärkersystemen nützlich ist. Ein vollständig polarisationsstabiles System erfordert eindeutig einen polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter über das Verstärkersystem. Die Spleiße zwischen unterschiedlichen Abschnitten des polarisationserhaltenden Lichtwellenleiters sollten sicherstellen, daß die Polarisationsachsen der Lichtwellenleiter ausgerichtet sind.

**[0075]** Da es vorteilhaft ist, soviel Pumpleistung wie möglich für den Soliton-Raman-Kompressor erhältlich zu haben, kann mehr als eine Pumpdiode verwendet werden. Eine Anordnung mit zwei Pumpdioden **63** und **64** ist ebenso in **Fig. 6** dargestellt. Eine ähnliche Anordnung könnte mit einer Doppelstufe für das (nicht dargestellte) Signallicht verwendet werden. Außerdem können Polarisations-Strahlenteiler für das Pumplicht bei den Wellenlängenmultiplex-Kopplern enthalten sein, damit die Verwendung von bis zu vier (nicht dargestellten) Pumpdioden gestattet wird.

**[0076]** Zusätzlich zu der Soliton-Kompression höherer Ordnung oder der Erzeugung von Raman-Solitons können adiabatische Impulsverstärker auch zur Verkürzung der Impulsbreite aus dem Oszillator verwendet werden. Zur Sicherstellung der Verstärkung in der Nähe der Adiabazität wird ein gegengerichtetes, gepumptes Verstärkersystem wie in **Fig. 7** dargestellt bevorzugt. Gegengerichtetes Pumpen gestattet eine Zunahme der Verstärker-Verstärkung pro Längeneinheit mit einer Abnahme der Impulsbreite bei der Abwesenheit einer Verstärkersättigung, was mit der Adiabazität kompatibel ist. Die Verwendung von polarisationserhaltenden Lichtwellenleitern ist bei derartigen Systemen eindeutig vorteilhaft.

**[0077]** Für Anwendungen bei konfokaler Zweiphoton-Mikroskopie ist es in der Abwesenheit von Beschränkungen hinsichtlich des Schadens und des Photobleichens auch nützlich, auf nahezu lineare Verstärkersysteme zum Erhalt eines hohen Werts  $M$  zurückzugreifen. Wiederum ist in diesem Fall ein gegengerichteter, gepumpter Verstärker am nützlichsten, da er die Nichtlinearität des Verstärkers minimiert, obwohl ein Doppelstufensystem ebenfalls möglich ist. Das erwartete Leistungsvermögen eines derartigen Systems kann durch dessen Vergleichen mit dem System gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel geschätzt werden. Angenommen, daß ein optimal entwickelter Einzelstufenverstärker ungefähr 30 % länger als ein Zweistufenverstärker sein muß, beträgt die optimale Länge des Verstärkers ungefähr  $L = 3,4$  m für einen Einzelstufenverstärker mit einem Er-Dotierpegel von ungefähr 750 ppm. Unter Verwendung eines PPLN-Kristalls mit einer Länge von ungefähr 3 mm kann eine Impulsbreite von ungefähr 500 fs bei der Frequenzverdopplungswellenlänge erhalten werden. Da der erwartete Kleinsignal-Verdopplungswirkungsgrad von PPLN ungefähr 95 %/nJ für einen bandbreitenbegrenzten, sech<sup>2</sup>-geformten Impuls ist, kann ein gesamter Verdopplungs-Wirkungsgrad von ungefähr 40 % für derartige Impulse erhalten werden. Daher kann die lineare Konfiguration gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel einen Leistungspegel von 23 mW bei der Frequenzverdopplungswellenlänge erzeugen, einen Wert von  $M$  von 30 % höher als denjenigen gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Jedoch berücksichtigt diese Zahl nicht Impulsverbreiterungseffekte bei „fast linearen“ Verstärkern und eine Verringerung des Frequenzumwandlungswirkungsgrads wegen der restlichen, kleinen Nichtlinearität derartiger Systeme. Falls die Verwendung von längeren Impulsen bei praktischen, konfokalen Zweiphoton-Meßsystemen nichtsdestotrotz kompatibel mit Beschränkungen hinsichtlich des Schadens und des Photobleichens ist, können längere Impulse bevorzugt werden, da sie das Meßsystem wegen der verringerten Dispersionsprobleme innerhalb des konfokalen Mikroskops vereinfachen. Es sei bemerkt, daß das kritische Element bei einem derartigen System ein sehr wirksamer Verstärker mit großem Kern und ein Oszillator ist, der keine ultrakurzen Impulse erzeugt, sondern eher Impulse mit Breiten von einigen 100 fs. Natürlich kann eine willkürlich lange Impulsbreite aus einem Breitband-Oszillator durch Verwendung von Spektralfilterung ausgewählt werden. Dies führt jedoch zu einem Leistungsverlust. Als bessere Alternative kann eine Einkopplungs-Impulsquelle verwendet werden, die eine Impulsbreite von mehr als 500 fs erzeugt. Die Verwendung von polarisationserhaltenden Lichtwellenleitern ist bei derartigen Systemen eindeutig vorteilhaft.

**[0078]** Wie bei dem ersten Ausführungsbeispiel beschrieben können Überlängenverstärker bei einem Soliton-Raman-Kompressor zum Erhalt eines maximalen Verdopplungs-Umwandlungs-Wirkungsgrades verwendet werden. Da dort eine sehr geringe Verstärkung in dem letzten Abschnitt eines Überlängenverstärkers vorliegt, kann ein undotierter Lichtwellenleiter **80** in dem letzten Abschnitt des Soliton-Raman-Kompressors ver-

wendet werden. Dann kann die Länge des Verstärkers zum Erhalt einer optimalen Signalverstärkung und daraufhin ein undotierter Lichtwellenleiter mit großem Kern in den Verstärker-Lichtwellenleiter zum Erhalt eines Soliton-Raman-Kompressorvorgangs aufgespleißt werden. Eine derartige Anordnung für einen Einzelstufenverstärker ist in **Fig. 8** abgebildet. Ein (nicht dargestellter) Doppelstufenaufbau kann ebenfalls implementiert werden.

**[0079]** Zur Maximierung des gesamten Wirkungsgrades des gesamten Systems können Verstärker **81** und **82** mit unterschiedlichen Dotierpegeln (wie auch in **Fig. 8** dargestellt) implementiert werden. Da der Wirkungsgrad von typischen Lichtwellenleiter-Verstärkern mit einer Abnahme des Dotierpegels bei den vorderen Stufen der Verstärkung zunimmt, können niedrige Dotierpegel für die Verstärker implementiert werden; da der Signalpegel bei den ersten Stufen der Verstärkung gering ist, kann eine größere Länge des Verstärkers mit einem niedrigen Dotierpegel toleriert werden.

**[0080]** Zur Erhöhung der erhaltbaren Pumpleistung für den Soliton-Raman-Kompressor und zur Minimierung der Kosten der Pumpquelle kann wie in **Fig. 9** dargestellt ein Doppelmantel-Lichtwellenleiter **90** implementiert werden. Doppelmantel-Lichtwellenleiter gestatten ein Pumpen des Systems mit Breitreifen-Diodenanordnungs-Lasern. Der Einfachheit halber ist nur eine einzelne Stufe in **Fig. 9** abgebildet. Zum Ermöglichen von Mantelpumpen können Er-dotierte oder Er-/Yb-dotierte Lichtwellenleiter verwendet werden. Die Erweiterung auf eine Doppelstufe ist aus der vorangehenden Diskussion ersichtlich. Gemäß **Fig. 9** wird die Pumpleistung über eine Endkopplung auf eine Diodenanordnung **91** über einen dichroitischen Spiegel **92** erzeugt. Jedoch können Multimoden-Lichtwellenleiterkoppler zur Ausführung dieser Funktion verwendet werden. Alternativ kann das Seitenkoppeln der Pumpleistung in den Doppelmantel-Lichtwellenleiter auch implementiert werden.

**[0081]** Da der Soliton-Raman-Kompressor ein hochgradig nichtlineares System ist, ist auch die Verwendung von Verstärkern oder undotierten Lichtwellenleitern mit großem Kern akzeptabel, die leicht mehrmodig arbeiten. Bei Multimoden-Lichtwellenleitern werden die Einkoppelbedingungen für den Verstärker-Lichtwellenleiter derart ausgewählt, daß vorzugsweise die Grundmode eingekoppelt wird, obwohl allgemein dann auch Moden höherer Ordnung erregt werden. Solange die Leistung in der Grundmode höher als oder vergleichbar mit der Leistung in all den anderen Moden ist, beeinflußt der Soliton-Raman-Kompressor die Grundmode zuerst. Die Raman-Verschiebung der Grundmode kann dann in Verbindung mit dem Frequenzverdoppler zum Erhalt eines nahezu beugungsbegrenzten Ausgangssignals bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge implementiert werden. Wiederum kann auch ein Doppelmantel-Lichtwellenleiter in einem derartigen System implementiert werden. Eine einen Multimoden-Lichtwellenleiter **100** verwendende mögliche Systemimplementierung ist in **Fig. 10** abgebildet. **Fig. 10** zeigt einen Einzelstufenaufbau, aber ein Doppelstufenaufbau ist auch möglich. Ein dichroitischer Großspiegel **92** kann zur Kopplung des Pumplichts aus einer Laserdioden **91** verwendet werden. Es sei jedoch bemerkt, daß Multimoden-Koppler vollständig aus Lichtwellenleitern auch zur Durchführung dieser Funktion verwendet werden können. Auf gleiche Weise kann auch eine Seitenkopplung des Pumplichts implementiert werden.

**[0082]** Außerdem ist wie vorstehend beschrieben die Anwendung eines Frequenzumwandlungsvorgangs nicht auf Lichtwellenleiter-Verstärker oder nichtlineare Lichtwellenleiter-Kompressoren beschränkt. Im Prinzip kann jede Art eines nichtlinearen Verstärkers bei einer Signalwellenlänge mit einer nichtlinearen Phasenverzögerung  $\Phi_{nl} > 5$  (wie vorstehend berechnet) verwendet werden, und eine Frequenzumwandlung kann dann einen Impuls mit hoher Qualität bei einer frequenzumgewandelten Wellenlänge erzeugen. Eine derartige Systemimplementierung ist allgemein in **Fig. 11** abgebildet. Eine Systemimplementierung mit einem Verstärker, einem nichtlinearen Kompressor und einem PPLN-Frequenzverdoppler ist in **Fig. 12** abgebildet. Natürlich können der Lichtwellenleiter-Verstärker und der Kompressor in ein einzelnes optisches Element kombiniert werden. Auf gleiche Weise könnten ein nichtlinearer Verstärker und ein linearer oder nichtlinearer Kompressor verwendet werden.

**[0083]** Wie vorstehend beschrieben ist die Verwendung eines PPLN für derartige Systeme besonders vorteilhaft, da der PPLN nicht kritisch phasenangepaßt ist und eine sehr effektive Frequenzumwandlung gestattet. Die Auswahl eines PPLN-Kristalls oder eines Frequenzwandlers mit einer Akzeptanzbandbreite bei der Signalwellenlänge von weniger als der Bandbreite der Quelle bei der Signalwellenlänge ist dann zur Erzeugung der Impulse mit der höchstmöglichen Qualität mit dem höchstmöglichen Umwandlungs-Wirkungsgrad vorteilhaft.

**[0084]** Darüber hinaus kann das Prinzip der Verwendung eines Frequenzwandlers mit einer Akzeptanzbandbreite bei der Signalwellenlänge von weniger als der Bandbreite bei der Signalwellenlänge zur Frequenzumwandlung bei jeder Quelle von kurzen Impulsen angewandt werden. Eine derartige Systemimplementierung ist

in **Fig. 13** abgebildet. Wie vorstehend beschrieben ist die Verwendung eines PPLN für derartige Systeme besonders vorteilhaft, da der PPLN nicht kritisch phasenangepaßt ist und eine Steuerung der Akzeptanzbandbreite einfach durch Steuerung der Länge des Kristalls gestattet. Ein derartiger Abstimmbereich ist dann durch Auswahl des PPLN mit unterschiedlichen Polperioden oder durch Veränderung der Temperatur des PPLN erreichbar. Alternativ könnte jeder Typ eines periodisch gepolten nichtlinearen Kristalls zur Ausführung der Funktion der Frequenzumwandlung verwendet werden.

**[0085]** Eine Vorrichtung erzeugt Femtosekunden-Impulse aus Laserverstärkern durch nichtlineare Frequenzumwandlung. Die Implementierung einer nichtlinearen Frequenzumwandlung gestattet die Entwicklung von hochgradig nichtlinearen Verstärkern bei einer Signalwellenlänge (SW), während ein Impuls mit hoher Qualität bei ungefähr einer frequenzverdoppelten Wellenlänge (FDW) noch beibehalten wird. Eine nichtlineare Frequenzumwandlung wird auch für eine begrenzte Wellenlängenabstimmung der frequenzverdoppelten Wellenlänge gestattet. Beispielsweise wird das Ausgangssignal aus einem nichtlinearen Lichtwellenleiter-Verstärker frequenzgewandelt. Durch Steuerung des Polarisationszustands des nichtlinearen Lichtwellenleiter-Verstärkers und durch Betrieb des die Solitonwelle gestattenden Dispersionsbereichs des Grundglases wird eine effektive nichtlineare Impulskompression für die Signalwellenlänge erhalten. Die erzeugte Impulsbreite wird durch Verwendung von Soliton-Kompression bei dem Vorhandensein der Raman-Eigenfrequenzverschiebung in dem nichtlinearen Lichtwellenleiter-Verstärker bei der Signalwellenlänge optimiert. Hochleistungs-Impulse werden durch Einsatz von Lichtwellenleiter-Verstärkern mit großen Kerndurchmessern erhalten. Der Wirkungsgrad des nichtlinearen Lichtwellenleiter-Verstärkers wird durch Verwendung eines Doppelmantel-Lichtwellenleiters (d.h. eines Lichtwellenleiters mit einem Doppelstufenprofil des Brechungsindex) und durch Pumpen von Licht direkt in den Innenkern dieses Lichtwellenleiters optimiert. Periodisch gepoltes  $\text{LiNbO}_3$  (PPLN) wird zur effektiven Umwandlung der Signalwellenlänge auf eine Frequenzverdopplungswellenlänge verwendet. Die Qualität der Impulse bei der Frequenzverdopplungswellenlänge kann durch nichtlineare Frequenzumwandlung der komprimierten und ramanverschobenen Signalimpulse bei der Signalwellenlänge weiter verbessert werden. Die Verwendung der Raman-Verschiebung verbessert den Abstimmbereich bei der Frequenzverdopplungswellenlänge weiter. Für Anwendungen bei konfokaler Mikroskopie wird ein besonderer linearer Lichtwellenleiter-Verstärker verwendet.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Erzeugung von optischen Hochleistungs-Impulsen, gekennzeichnet durch eine optische Quelle (10) zur Erzeugung von Signallicht, einen nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) mit einer nichtlinearen Phasenverzögerung, der das durch die optische Quelle (10) erzeugte Signallicht empfängt, und einen Frequenzwandler (20), der aus dem nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) ausgegebene optische Impulse empfängt, wobei der Frequenzwandler (20) die optischen Hochleistungs-Impulse an dessen Ausgang erzeugt.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine zwischen der optischen Quelle (10) und dem nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) angeordnete Polarisations-Steuereinrichtung (14, 15), wobei die Polarisations-Steuereinrichtung (14, 15) den Polarisationszustand des durch den nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) empfangenen Signallichts einstellt.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisations-Steuereinrichtung Wellenplatten (14, 15) aufweist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Quelle (10) einen Lichtwellenleiter-Oszillator aufweist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) einen Verstärker-Lichtwellenleiter (11; 81; 82; 100) aufweist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker-Lichtwellenleiter (11) mit seltenen Erden dotiert ist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker-Lichtwellenleiter (11) mit  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{ErYb}^{3+}$ ,  $\text{PrTm}$  oder  $\text{Ho}$  dotiert ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker-Lichtwellenleiter (11, 18;

**81, 82; 90; 100)** eine numerische Apertur (NA) von weniger als 0,15 aufweist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker-Lichtwellenleiter (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) eine Kernfläche von mehr als  $50 \mu\text{m}^2$  aufweist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker-Lichtwellenleiter (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) eine Impulskompression ausführt.

11. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker-Lichtwellenleiter (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) einen Soliton-Raman-Kompressor (SRC) aufweist.

12. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen Impulskompressor zur Komprimierung der aus dem nichtlinearen Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) ausgegebenen optischen Impulse.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Impulskompressor ein Soliton-Raman-Kompressor (SRC) ist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Frequenzwandler (**20**) einen periodisch gepolten Kristall aufweist.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass der periodisch gepolte Kristall (**20**) einen periodisch gepolten Lithium-Niobat-Kristall (PPLN) aufweist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) in einem Doppelstufenaufbau angeordnet ist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, gekennzeichnet durch einen Faraday-Rotationsspiegel (**19**), eine Lichtwellenleiter-Polarisations-Steuereinrichtung oder eine  $\lambda/4$ -Wellenplatte, die an einem Ende des nichtlinearen Verstärkers (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) angeordnet ist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen zwischen der optischen Quelle (**10**) und dem nichtlinearen Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) angeordneten Isolator (**12**).

19. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen an einem Ausgang des nichtlinearen Verstärkers (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) angeordneten Polarisations-Strahlenteiler (**13**).

20. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) in einem Einzelstufenaufbau angeordnet ist.

21. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine mit dem nichtlinearen Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) über einen ersten Wellenlängenmultiplex-Koppler (**17; 61**) gekoppelte erste Pumpe (**16; 63**), wobei die erste Pumpe (**16; 63**) Pumplicht für den nichtlinearen Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) erzeugt.

22. Vorrichtung nach Anspruch 21, gekennzeichnet durch eine über einen zweiten Wellenlängenmultiplex-Koppler (**62**) an den nichtlinearen Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) gekoppelte zweite Pumpe (**64**), wobei die zweite Pumpe (**64**) Pumplicht für den nichtlinearen Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) erzeugt.

23. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärker-Lichtwellenleiter (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) ein polarisationserhaltender Lichtwellenleiter ist.

24. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine zwischen der optischen Quelle (**10**) und dem nichtlinearen Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) angeordnete erste Polarisations-Steuereinrichtung (**14, 15**) und eine zweite Polarisations-Steuereinrichtung (**60**) an einem Ausgang des nichtlinearen Verstärkers (**11, 18; 81, 82; 90; 100**).

25. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) einen gegengerichteten, gepumpten Verstärker aufweist.

26. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (**11, 18; 81, 82; 90; 100**) ein Überlängenverstärker ist und einen undotierten Lichtwellenleiter (**80**) an dessen Ausgangsen-



de aufweist.

27. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (81, 82) einen ersten Verstärker-Lichtwellenleiter (81) mit einer ersten Dotierung und einen zweiten Verstärker-Lichtwellenleiter (82) mit einer zweiten Dotierung aufweist.

28. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) einen mit einem Diodenanordnungs-Laser (91) gepumpten Doppelmantel-Lichtwellenleiter (90) aufweist.

29. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Pumplicht und das Signallicht direkt in einen Innenkern des Doppelmantel-Lichtwellenleiters (90) eingekoppelt werden.

30. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) einen Multimoden-Verstärker-Lichtwellenleiter (100) aufweist.

31. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der nichtlineare Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) einen dispersionskompensierenden Lichtwellenleiter (18) aufweist.

32. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen dispersionskompensierenden Lichtwellenleiter (18).

33. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine spektrale Akzeptanzbandbreite des Frequenzwandlers (20) kleiner als eine Ausdehnung des Spektrums der aus dem nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) ausgegebenen optischen Impulse ist, wobei der Frequenzwandler (20) Energie aus einem Abschnitt des Spektrums der aus dem nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) ausgegebenen optischen Impulse, der größer als die spektrale Akzeptanzbandbreite ist, in die spektrale Akzeptanzbandbreite umwandelt.

34. Vorrichtung zur Erzeugung von optischen Hochleistungs-Impulsen, gekennzeichnet durch eine optische Quelle (10) zur Erzeugung von optischen Hochleistungs-Impulsen und einen Frequenzwandler (20), der durch einen nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) erzeugte optische Impulse empfängt und optische Hochleistungs-Impulse mit einer frequenzumgewandelten Wellenlänge erzeugt, wobei eine spektrale Akzeptanzbandbreite des Frequenzwandlers (20) kleiner als eine Ausdehnung des Spektrums der optischen Impulse aus der optischen Quelle (10) ist, und wobei der Frequenzwandler (20) Energie aus einem Abschnitt des Spektrums der optischen Impulse aus der optischen Quelle (10), der größer als die spektrale Akzeptanzbandbreite ist, in die spektrale Akzeptanzbandbreite umwandelt.

35. Vorrichtung nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, dass der Frequenzwandler (20) periodisch gepolt ist.

36. Vorrichtung zur Erzeugung von optischen Hochleistungs-Impulsen, gekennzeichnet durch eine optische Quelle (10) zur Erzeugung eines Signallichts, einen nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100), der das durch die optische Quelle (10) erzeugte Signallicht empfängt, einen nichtlinearen Kompressor, der durch den nichtlinearen Verstärker (11, 18; 81, 82; 90; 100) erzeugte optische Impulse empfängt, und einen periodisch gepolten Frequenzwandler (20), der durch den nichtlinearen Kompressor komprimierte optische Impulse empfängt und die optischen Hochleistungs-Impulse mit einer frequenzumgewandelten Wellenlänge erzeugt.

37. Vorrichtung zur Erzeugung von optischen Hochleistungs-Impulsen, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (10) zur Erzeugung von Signallicht, eine Einrichtung (11, 18; 81, 82; 90; 100) zur nichtlinearen Verstärkung des Signallichts und eine Einrichtung (20) zur Frequenzumwandlung von durch die Einrichtung (11, 18; 81, 82; 90; 100) zur nichtlinearen Verstärkung erzeugten optischen Impulsen, wobei die Einrichtung (20) zur Frequenzumwandlung die optischen Hochleistungs-Impulse an dessen Ausgang erzeugt.

38. Vorrichtung nach Anspruch 37, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (60) zur Steuerung des Polarisationszustands des Signallichts.

39. Vorrichtung nach Anspruch 37, gekennzeichnet durch eine Einrichtung zur Komprimierung der durch die Einrichtung (11, 18; 81, 82; 90; 100) zur nichtlinearen Verstärkung erzeugten optischen Impulse.

40. Vorrichtung nach Anspruch 37, gekennzeichnet durch eine Einrichtung zur Reflexion von optischen Impulsen durch die Einrichtung (11, 18; 81, 82; 90; 100) zur nichtlinearen Verstärkung, wodurch ein Doppelstufenaufbau erzeugt wird.

41. Vorrichtung nach Anspruch 37, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (16; 63) zum Pumpen von Pumplicht in die Einrichtung (11, 18; 81, 82; 90; 100) zur nichtlinearen Verstärkung.

42. Verfahren zur Erzeugung von optischen Hochleistungs-Impulsen, gekennzeichnet durch die Schritte Erzeugen eines Signallichts, nichtlineares Verstärken des Signallichts zur Erzeugung von verstärkten optischen Impulsen und Umwandeln der Frequenz der verstärkten optischen Impulse zur Erzeugung der optischen Hochleistungs-Impulse.

43. Verfahren nach Anspruch 42, gekennzeichnet durch den Schritt des Steuerns des Polarisationszustands des Signallichts.

44. Verfahren nach Anspruch 42, gekennzeichnet durch den Schritt des Komprimierens der optischen Impulse.

45. Verfahren nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Impulse während des Schritts des nichtlinearen Verstärkens komprimiert werden.

46. Verfahren nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, dass ein Doppelmantel-Lichtwellenleiter (90) eine nichtlineare Verstärkung ausführt.

47. Verfahren nach Anspruch 46, gekennzeichnet durch den Schritt des Einkoppelns von Pumplicht und des Signallichts direkt in einen inneren Kern des Doppelmantel-Lichtwellenleiters (90).

48. Verfahren nach Anspruch 42, gekennzeichnet durch den Schritt des Reflektierens der optischen Impulse durch einen Verstärker-Lichtwellenleiter (11, 18; 81, 82; 90; 100), wodurch eine Doppelstufenkonfiguration erzeugt wird.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

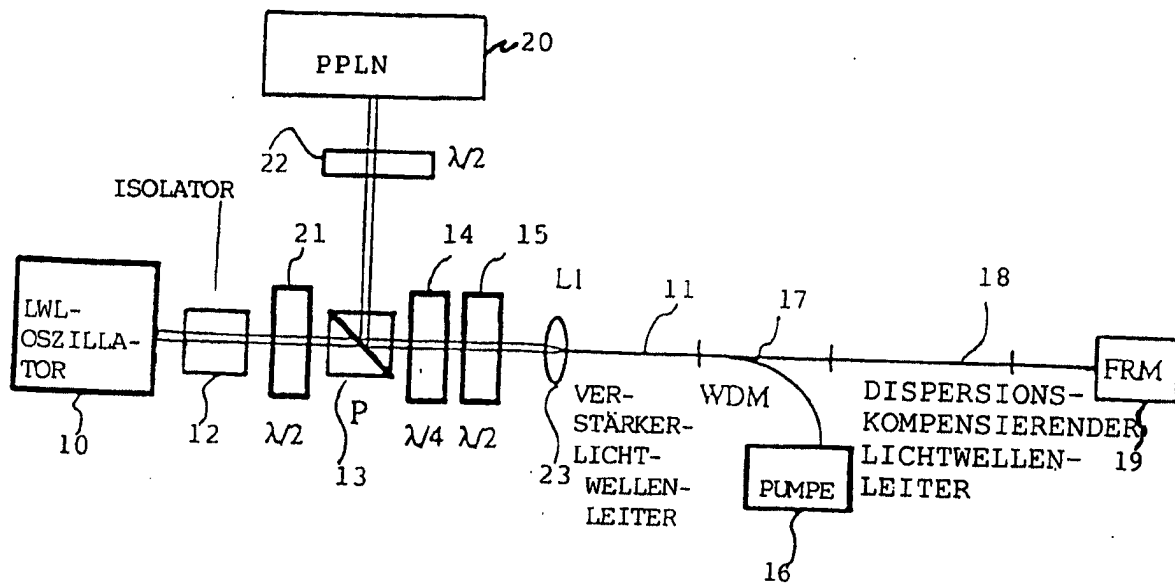


FIG. 2

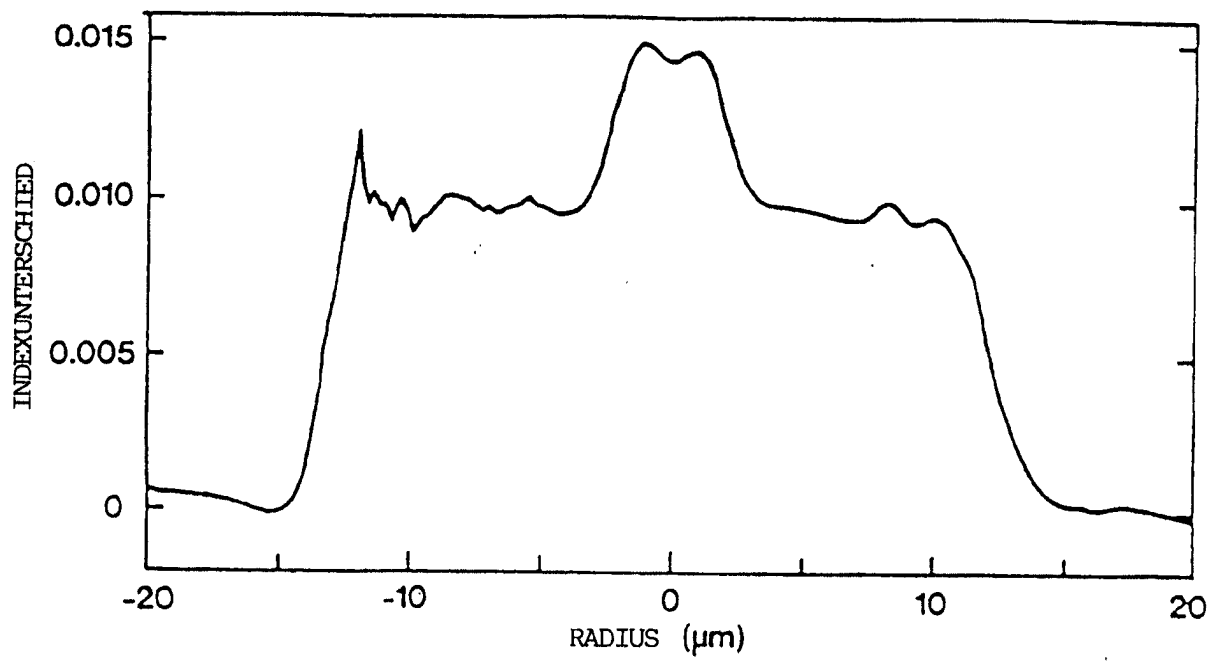
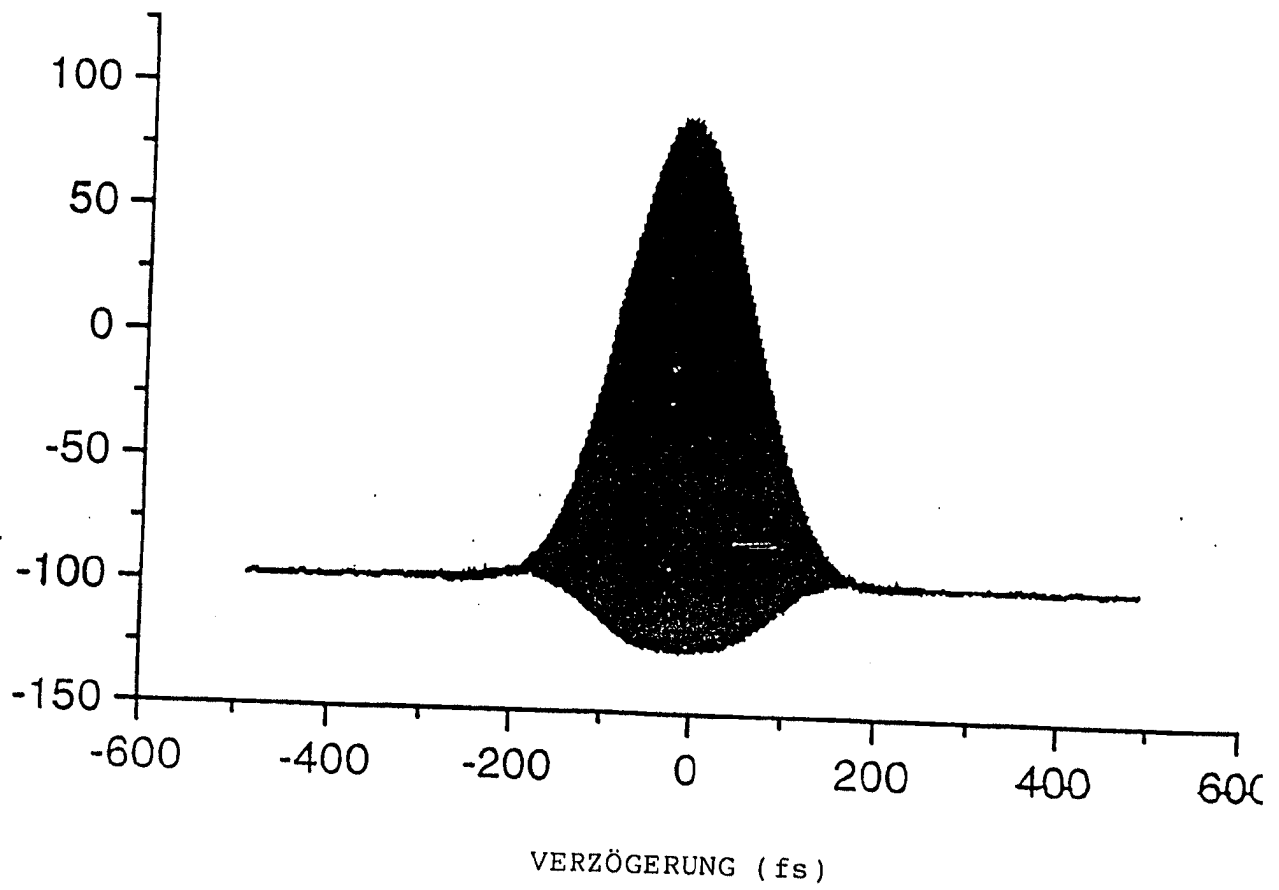


FIG. 3



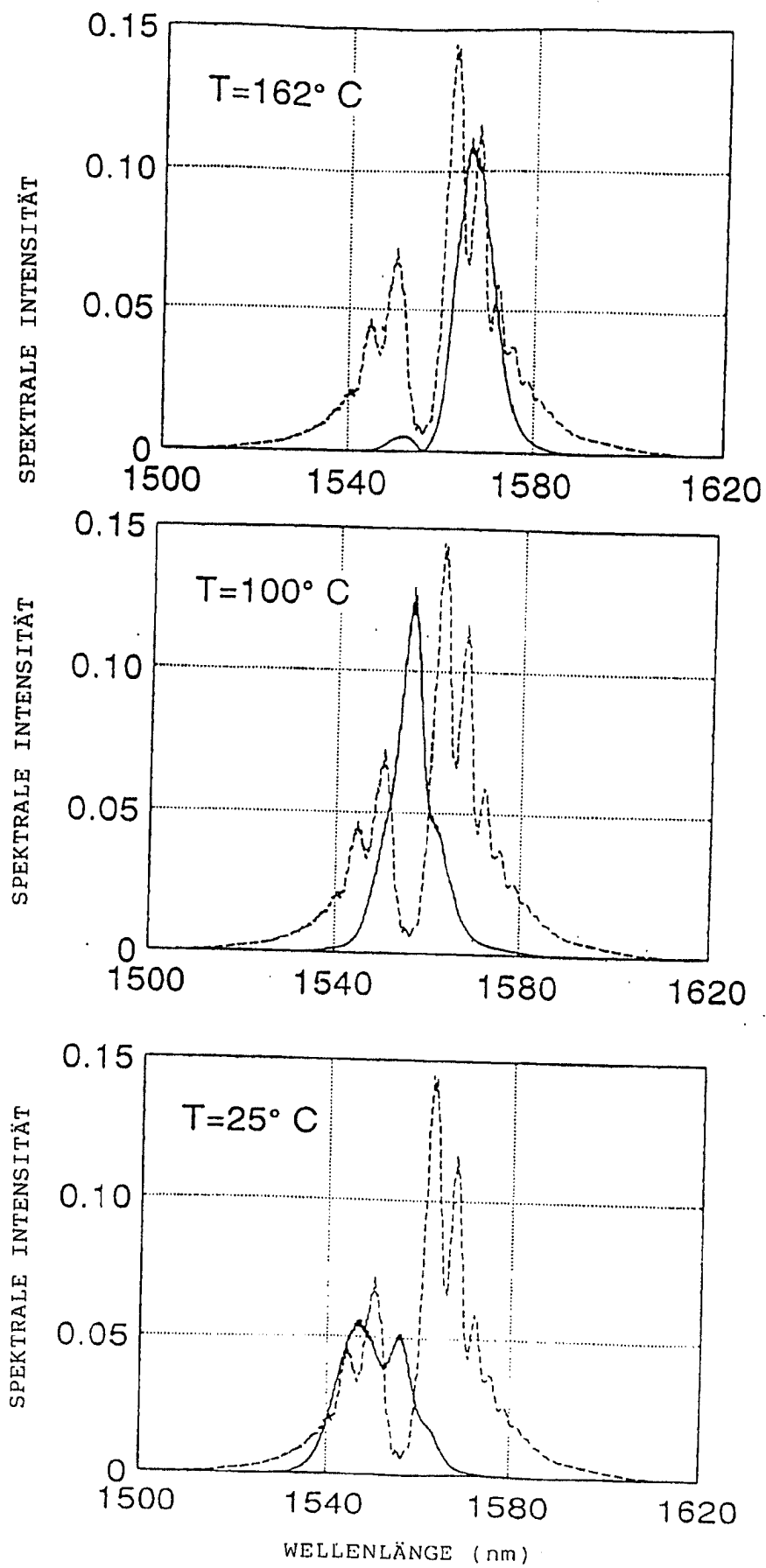


FIG. 5

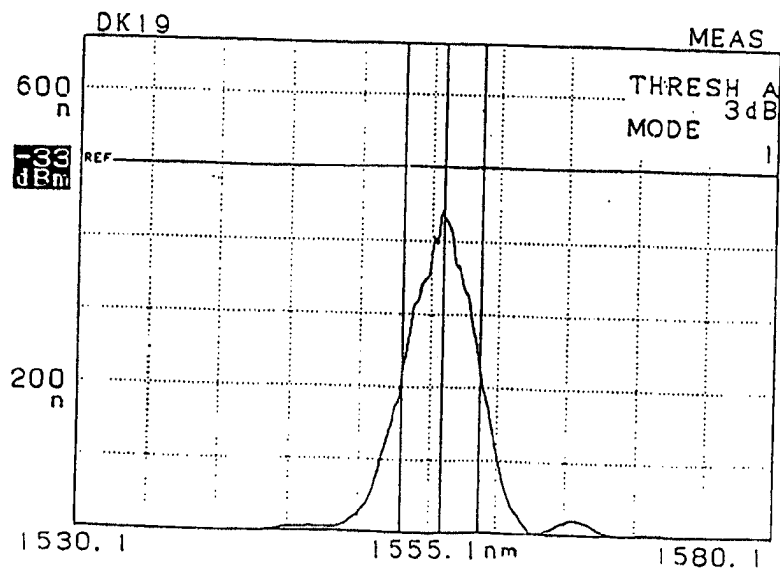
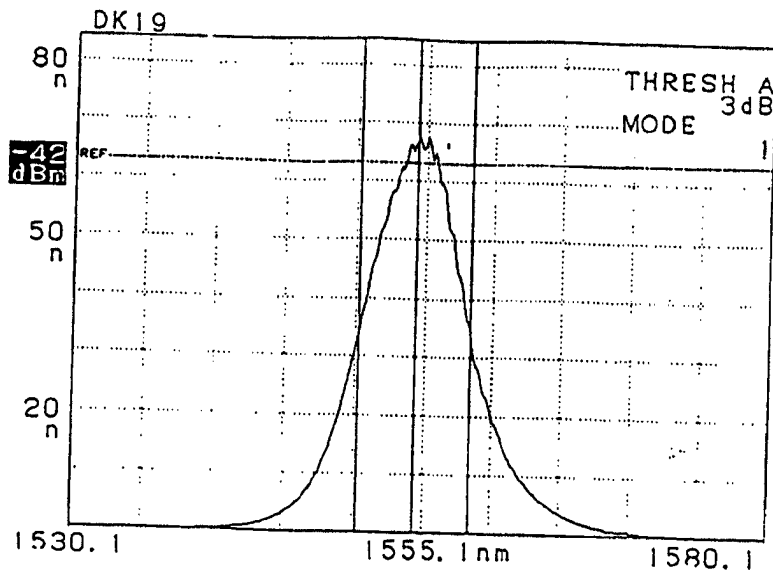




FIG. 6

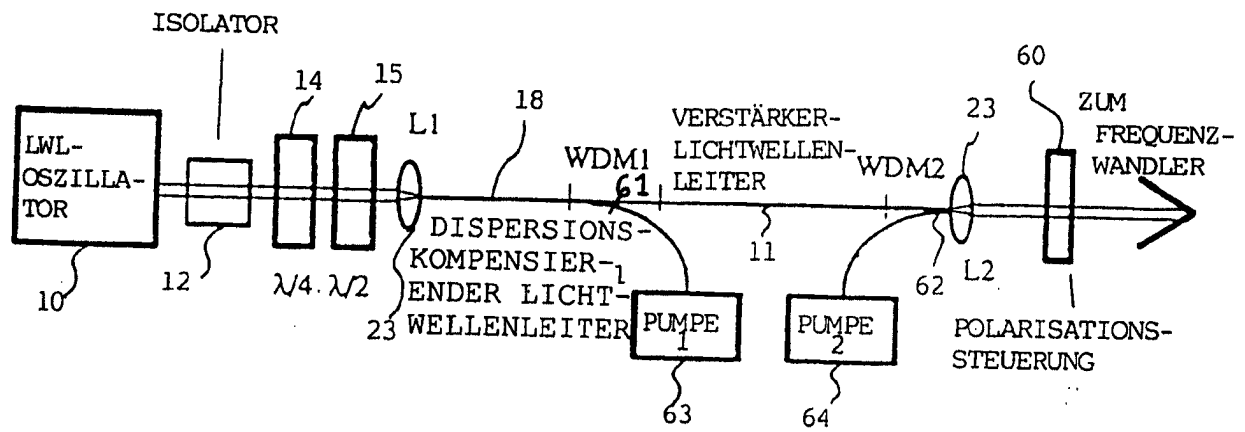


FIG. 7

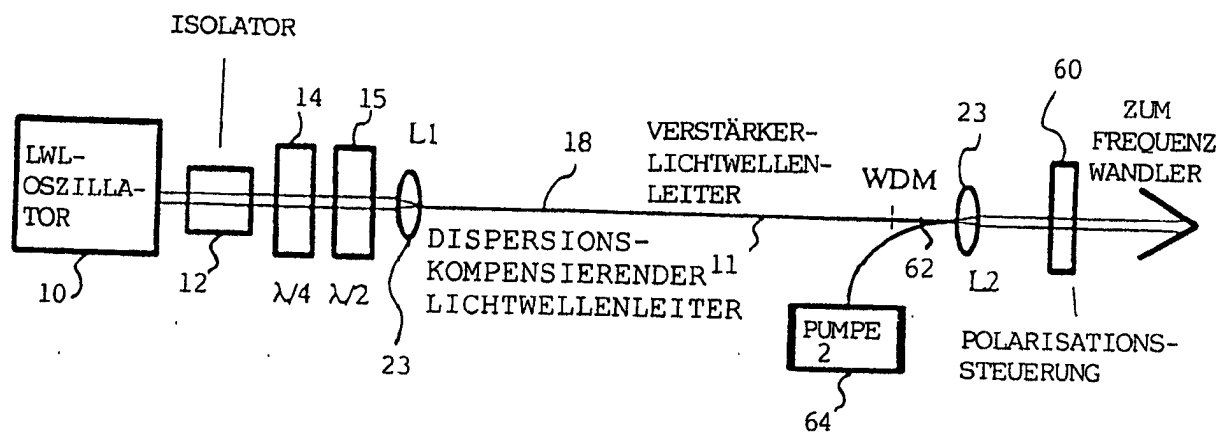


FIG. 8

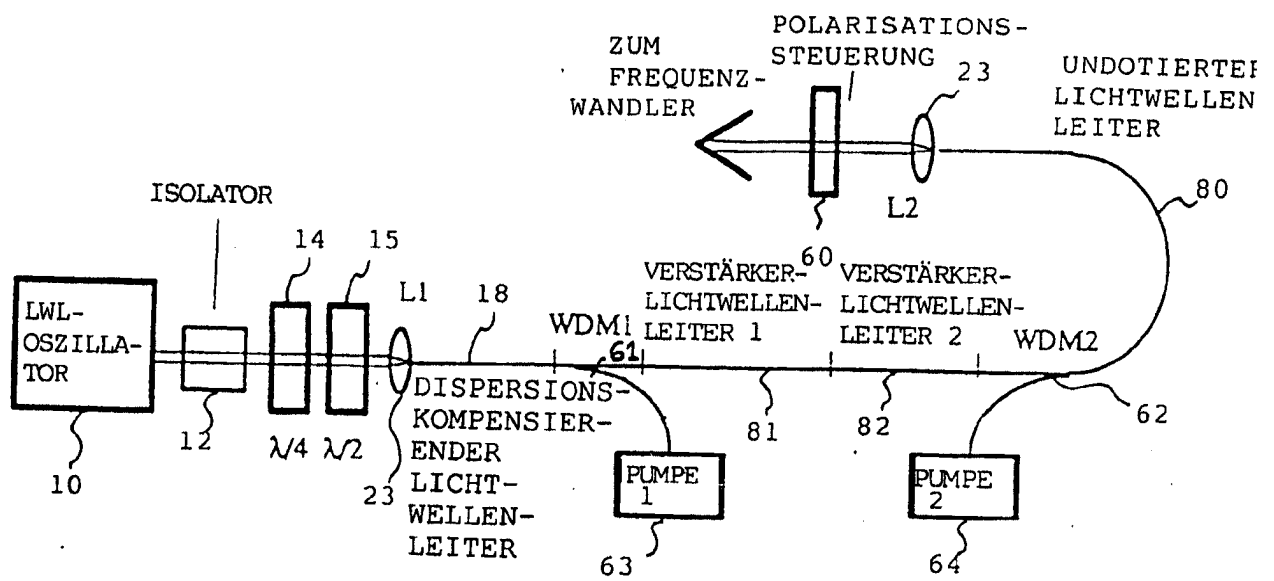


FIG. 9

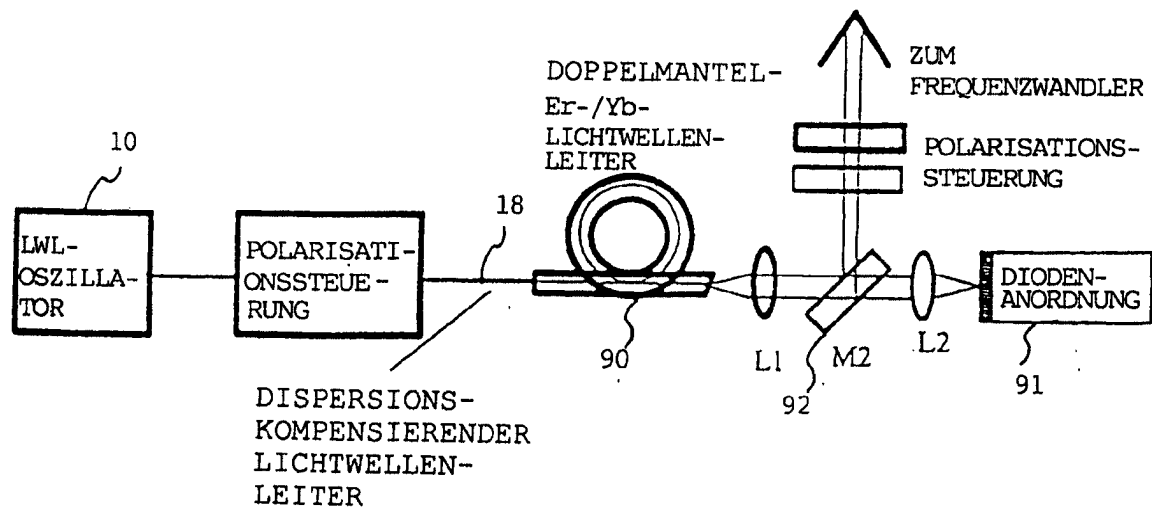


FIG. 10

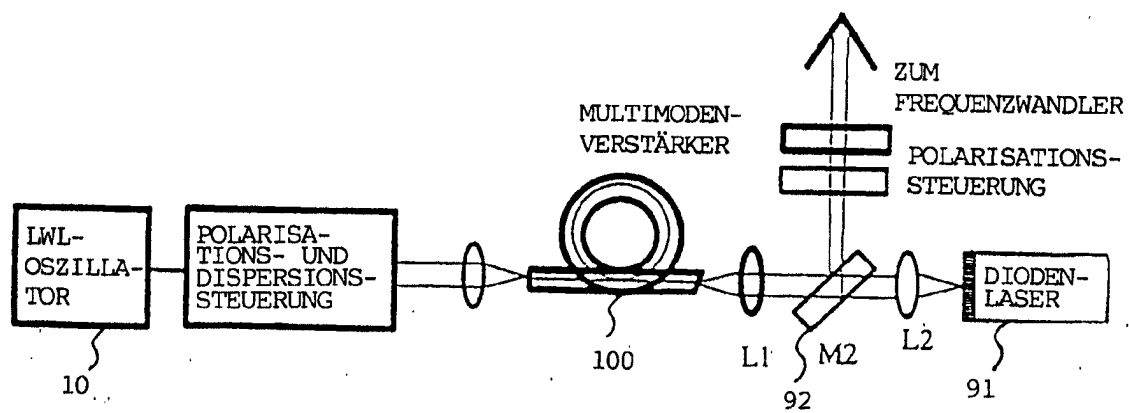


FIG. 11

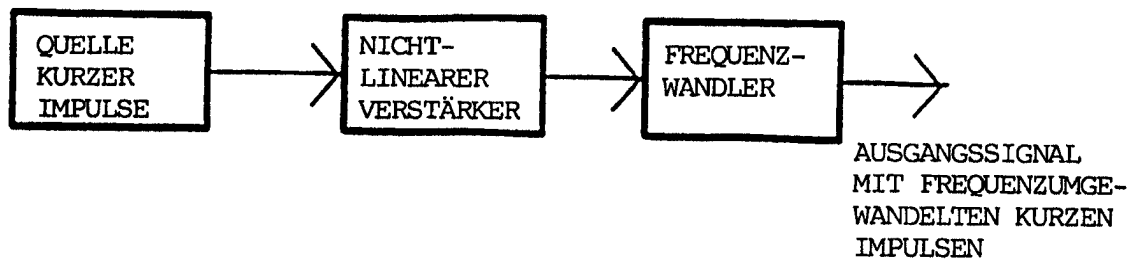


FIG. 12

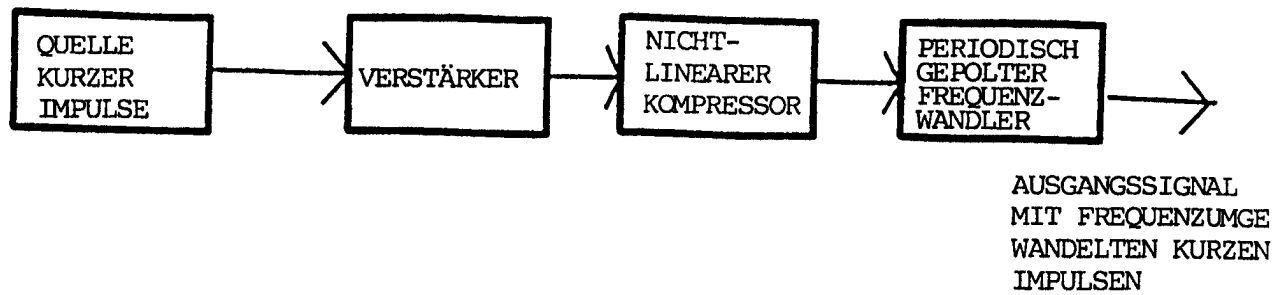


FIG. 13

